

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE UN MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA EN ORDENADOR**

TESIS  
PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CARLOS EDUARDO ORELLANA SARAVIA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 1,995.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

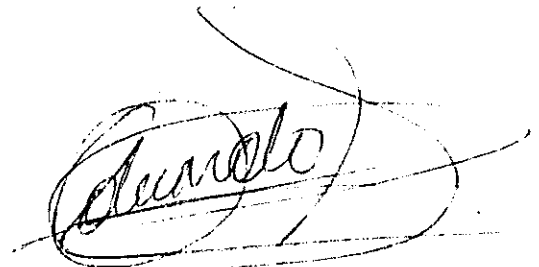
08  
T(3689)  
C.4

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración el trabajo de tesis titulado:

### ANÁLISIS DE UN MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA EN ORDENADOR

tema que me fuera asignado por la dirección de la Escuela de Mecánica eléctrica, con fecha 22 de octubre de 1,993.



Carlos Eduardo Orellana Saravia.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA**

DECANO: ING. JULIO ISMAEL GONZÁLEZ PODSZUECK  
VOCAL PRIMERO: ING. MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ GUERRA  
VOCAL SEGUNDO: ING. JACK DOUGLAS IBARRA SOLORZANO  
VOCAL TERCERO: ING. JUAN ADOLFO ECHEVERRÍA MÉNDEZ  
VOCAL CUARTO: BR. FERNANDO W. DE LEÓN CONTRERAS  
VOCAL QUINTO: BR. PEDRO IGNACIO ESCALANTE PASTOR  
SECRETARIO: ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ

**TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO: ING. JULIO ISMAEL GONZÁLEZ PODSZUECK  
EXAMINADOR: ING. EDGAR F. MONTÚFAR URÍZAR  
EXAMINADOR: ING. ALEJANDRO FALLA FLORES  
EXAMINADOR: ING. ENRIQUE E. RUIZ CARBALLO  
SECRETARIO: ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

Ref. EIME.283.93  
22 de octubre de 1,993

Señor  
Carlos Eduardo Orellana Saravia  
Carnet No. 86-15184  
Presente.

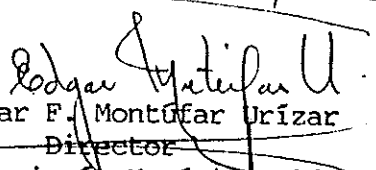
Estimado señor Orellana.

Me permito hacer de su conocimiento que, esta Dirección de Escuela ha aprobado su protocolo de tesis titulado: **Análisis de un motor de corriente directa en ordenador**. Asimismo, se aprobó que este trabajo sea asesorado por el Ing. Stuardo Noriega Mota.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Edgar F. Montúfar Urizar  
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

EEMU/sdem.

cc. Archivo.





FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

Guatemala Agosto 25, 1995

Ing. José Luis Herrera Gálvez.  
Coordinador de Área de Electrotecnia  
Escuela de Ingeniería de Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería USAC  
Su despacho

Estimado Ing. Herrera.

Por este medio me permito sugerir para su aprobación el trabajo de tesis desarrollado por el señor **Carlos Eduardo Orellana Saravia**, titulado: **Análisis de un Motor de Corriente Directa en Ordenador** ya que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad de saludarlo.

Atentamente,



Ing. Stuardo Benjamín Noriega Mota  
Asesor de Tesis



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 28 de septiembre de 1,995.

Señor Director  
Ing. Edgar Montúfar Urizar  
Escuela Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.  
Su despacho.

Señor Director.

Me permito sugerir para su aprobación el trabajo de tesis desarrollado por el estudiante **Carlos Eduardo Orellana Saravia**, titulado: **Análisis de un motor de corriente en ordenador** ya que considero que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, me suscribo de usted,

Atentamente,

Ing. José Luis Herrera Galvez.  
Coordinador del Área de Electrotecnia.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA

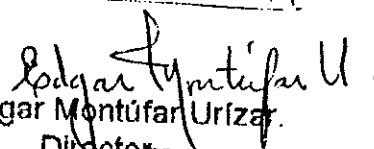


FACULTAD DE INGENIERIA

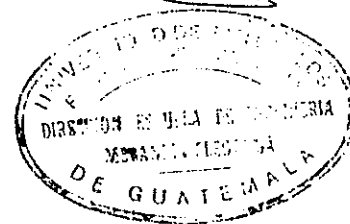
Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el visto bueno del Coordinador de Área, al trabajo de tesis del estudiante **Carlos Eduardo Orellana Saravia**, titulada: **Análisis de un Motor de Corriente Directa en Ordenador**, procede a la autorización del mismo.

  
Ing. Edgar Montúfar Urizar  
Director

Guatemala, 3 de Octubre de 1,995.



PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

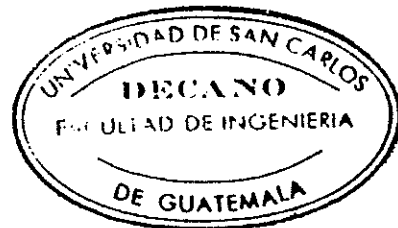
El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de tesis: **Análisis de un motor de corriente directa en ordenador**, del estudiante **Carlos Eduardo Orellana Saravia**, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

Ing. Julio Ismael González Podszueck

Decano

Guatemala, 7 de noviembre de 1,995







## CONTENIDO

<b>GLOSARIO</b>	<i>i</i>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<i>iii</i>
<b>CAPITULO 1</b>	
<b>PRINCIPIOS DE LA MAQUINA DE CORRIENTE DIRECTA</b>	<b>1</b>
1.1 Voltaje inducido en una espira giratoria	2
1.2 Obtención de un voltaje de corriente directa:	6
1.3 Par producido por la espira giratoria:	6
1.4.1 Reacción de armadura.	9
1.4.2 Eje directo D y cuadratura Q.	13
1.4.3 Polos de conmutación.	14
1.4.4 Polos de compensación.	14
1.4.5 Devanado de armadura.	15
1.4.6 La conmutación.	18
1.5 Motores de corriente directa:	19
1.5.1 Motor con excitación independiente:	20
1.5.2 Motor con excitación en derivación:	22
1.5.3 Motor de excitación serie:	24
1.5.4 Motor compuesto:	26
1.5.4.1 Ventajas de un motor compuesto acumulativo:	26
1.5.5 Motor compuesto diferencial:	28
1.5.6 Motor con campo de imanes permanentes	29
1.6 Pruebas para encontrar las pérdidas en un motor de CD.	29
1.6.1 Rotor:	29
1.6.2 Devanados de compensación y de conmutación:	
1.6.3 Escobillas:	29
1.6.4 Saturación magnética:	29
1.6.5 Pérdidas por fricción. Aerodinámicas y del núcleo	30
<b>CAPITULO 2</b>	
<b>ANÁLISIS DE TRANSITORIOS Y SISTEMAS DINÁMICOS DE CARGA EN UN MOTOR DE CD.</b>	<b>31</b>
2.1 Ecuaciones dinámicas:	31
2.2 Motor con excitación separada y con campo constante	32

2.3	Regulación de la velocidad en motores de corriente directa	37
2.3.1.	Variación por control de armadura	38
2.3.2.	Control por campo	39

### **CAPITULO 3**

#### **ELECTRÓNICA DE POTENCIA EN MOTORES CD.**

3.1.	Control electrónico de motores de corriente directa	41
3.2.	Secuencia de disparo y dirección de la corriente en el controlador.	44
3.3	Análisis matemático de un convertidor de corriente directa.	46
3.4	Mando de un vareador de velocidad	51
3.5	Disparo del sistema de control de velocidad de retroalimentación por tacometro	52
3.6.	Frenado dinámico en motores de CD	52
3.7.	Frenado dinámico automático, electrónico	54

### **CAPITULO 4**

#### **CRITERIOS DE LA SELECCIÓN DE UN MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA**

4.1	En consideración el tipo de servicio a que estará sometido el motor.	56
4.2	Servicio continuo	56
4.3	Servicio continuo con carga intermitente o carga pulsante.	57
4.4	Servicio continuo con carga intermitente o carga pulsante de corta duración	58
4.5	Servicio con carga intermitente o carga pulsante con tiempos de apagado y encendido del motor	58
4.6	Servicio continuo con carga variable	59
4.7	Servicio con carga variable intermitente o pulsante con tiempos de apagado y encendido del motor	60
4.8	Eficiencia:	60
4.9	Uso y comportamiento de los motores de corriente directa	61
4.9.1.	Motor serie	61
4.9.2.	Motor derivación o paralelo	61
4.9.3.	Motor con excitación compuesto	61
4.9.4.	Motor con excitación separada	62

4.10	Otros aspectos que se deben de tomar en cuenta al seleccionar un motor CD	62
4.10.1	Humedad y temperatura del medio ambiente	63
4.10.2	Ambiente saturado de polvo y agua	63
4.10.3	Motores que trabajan a velocidades bajas por períodos de tiempos largos	63
4.10.4	Efectos de la altura sobre los motores CD	64

## **CAPITULO 5**

### **ANÁLISIS DE UN MOTOR DC EN ORDENADOR**

5.1	Manual y uso del programa	65
5.2	Parámetros necesarios para correr el programa	65
5.3	Corrida del programa	65
5.3.1	Pantalla de presentación	66
5.3.2	Pantalla de consulta	66
5.3.3	Modo gráfico	67
5.3.4	Pantalla ingreso de datos	67
5.3.5	Pantalla de espera	68
5.3.6	Pantalla gráfica	68
5.3.7	Pantalla datos ejemplo	68
5.4	Modo numérico	69
5.4.1	Pantalla ejemplo	69
5.4.2	Pantalla ingreso de datos	69
5.4.3	Pantalla de ecuación característica	69
5.4.4	Pantalla variación	70
5.5	Modo finalizar	70
5.6	Ejemplo motor real.	70

<b>CONCLUSIONES</b>	72
---------------------	----

<b>RECOMENDACIONES</b>	74
------------------------	----

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	75
---------------------	----

### **APÉNDICES**

1	Introducción al motor de corriente eléctrica directa sin escobillas	77
2	Rectificador controlado de silicio SCR	86
3	Listado del programa pascal	88

## GLOSARIO

**ARMADURA:** a la parte giratoria en un motor de corriente directa se le llama armadura o inducido.

**BUSS O MODULO DE BUSS:** en los controles de motores de corriente directa sin escobillas, se le llama buss a un banco de capacitores o condensadores los cuales proveen la energía.

**CAMPO:** en un motor de corriente directa se le llama campo a la parte estacionaria del motor el cual esta formado por un núcleo y enrollamiento de alambre.

**ENTREHIERRO:** es el espacio existente entre el rotor y el estator en un motor eléctrico o un circuito magnético.

**FRENADO DINÁMICO:** se les llama así a los métodos utilizados para frenar un motor eléctrico inmediatamente después de ser desenergizado.

**INDUCTANCIA:** es el número de concatenamientos de flujo magnético por unidad de corriente eléctrica.

**RELUCTANCIA:** es la oposición al paso de flujo magnético en un circuito magnético.

**RESISTENCIA:** es la oposición al flujo de corriente eléctrica en un circuito eléctrico.

**TRANSITORIO:** es el período de tiempo que existe desde el momento de arranque de un motor eléctrico hasta que alcanza su estado estable.

**VARIADOR DE VELOCIDAD:** es un aparato de control por medio del cual se gobierna la velocidad de un motor eléctrico.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el crecimiento de las industrias es tan elevado que ha obligado a generar energía eléctrica en grandes cantidades de potencia. Esta energía eléctrica es convertida en energía mecánica a través de un movimiento rotatorio por medio de motores eléctricos; éstos consisten en circuitos magnéticos generados por un circuito eléctrico que tienen bases mecánicas, en los cuales el circuito magnético es excitado por medio de una fuente de energía eléctrica.

La energía eléctrica producida en su mayoría es de corriente alterna. Actualmente más del 50% de los motores que se utilizan son de corriente directa, los que ofrecen grandes ventajas en sistemas de velocidad variable y par constante, que se necesitan en muchos procesos industriales. La forma de producir corriente directa para estos motores es convertir la corriente alterna en directa; esto se logra por medio de convertidores electrónicos y antiguamente se lograba por medio de máquinas generadoras de corriente directa. En los convertidores, es analizado cómo varían la velocidad y a través de qué parámetros efectúan esta operación. También se describen los diferentes tipos de motores CD, sus características y la forma en que operan.

Por medio de un ordenador, se analiza un motor CD durante el transitorio de arranque, donde se muestra como varían los parámetros, lo que sería muy laborioso de calcular sin la ayuda de un ordenador.

# CAPITULO 1

## PRINCIPIOS DE LA MAQUINA DE CORRIENTE DIRECTA

Para iniciar el análisis de una máquina rotativa, se estudiará una espira de alambre de forma rectangular, que gira alrededor de un eje fijo en un campo magnético generado por un imán permanente; la parte giratoria se llama rotor y la parte estacionaria se llama estator.

La espira se coloca incrustada en el núcleo del rotor de material ferromagnético; las caras polares son curvadas, en las cuales va colocado el rotor y se forma un espacio entre el rotor y el estator el cual se llama entrehierro y es de longitud constante en todo su trayecto (Ver figura 1).

La reluctancia del hierro es mucho menor que la del aire por tal razón el flujo magnético ( $\phi$ ) debe seguir la distancia más corta entre las superficies del rotor y el estator, la cual será perpendicular a las superficies de ambos, por lo tanto la densidad de flujo será constante en todo el entrehierro.

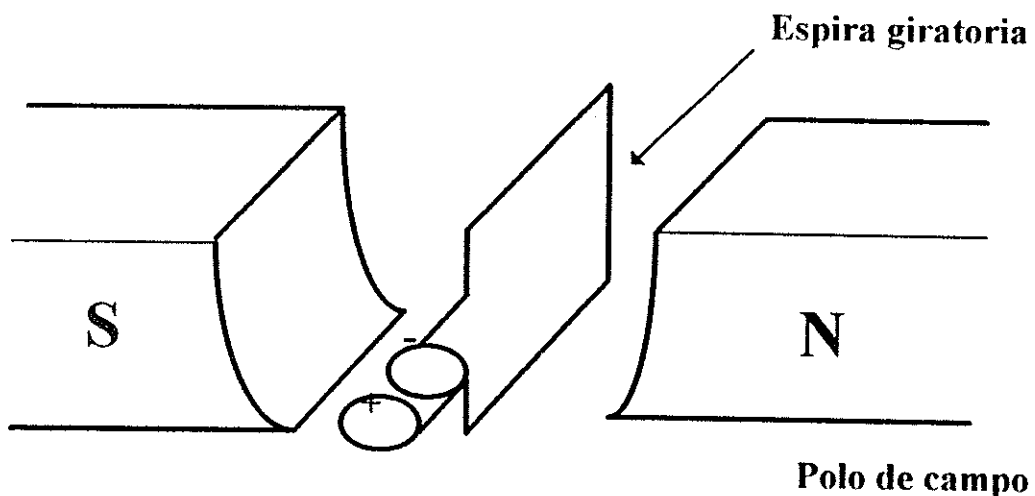


Figura 1, Motor elemental de una espira y de dos polos.



### 1.1 Voltaje Inducido En Una Espira Giratoria

Cuando el rotor gire, inducirá un voltaje en la espira, con sus lados 1,2 y 3,4. (Ver fig. 2). El campo magnético es constante y perpendicular a la superficie del rotor en cualquier punto frente a la cara polar, y cae a cero cuando más se retire de la cara polar, es decir entre los dos polos.

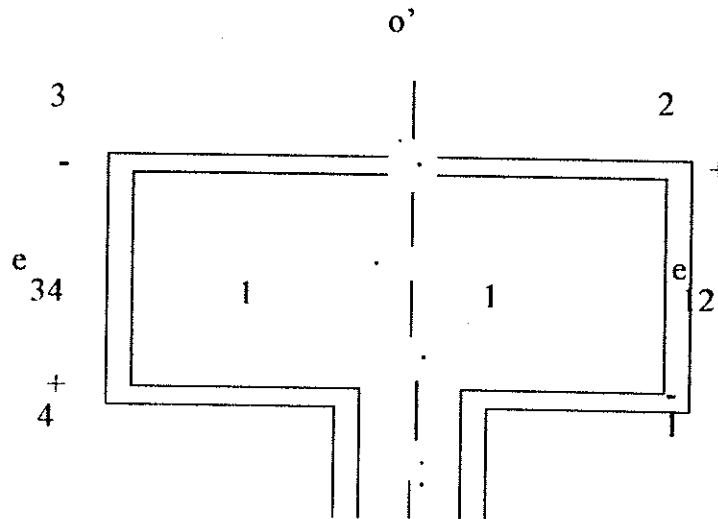


Figura 2, Espira giratoria

Para obtener el voltaje total inducido en la espira, se puede calcular por el principio de superposición:

$$\sum e_{\text{tot}} = e \quad (1.1)$$

$v$  = velocidad tangencial.  
 $B$  = campo magnético.  
 $I$  = corriente de espira.

De la ecuación de Faraday tenemos:

$$e_{\text{ind}} = (v \times B) \cdot I \quad (1.2)$$

Para los puntos de 1 a 2. Este segmento gira tangencialmente a la velocidad con que gira el rotor, el campo magnético  $B$  es perpendicular a la superficie del rotor.

Realizando el producto  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , tenemos que el voltaje inducido en entre estos puntos será:

$$e_{12} = vBl \quad (1.3)$$

Este voltaje tiene valor nulo en los puntos donde se divide el polo positivo del negativo.

**Para los puntos de 2 a 3.** En este punto se debe observar que el producto  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  tiene un valor ya sea hacia dentro del rotor o hacia afuera del mismo; este valor será cero debido a que el vector resultante siempre será perpendicular a la longitud formada por estos puntos.

$$e_{23} = 0 \quad (1.4)$$

**Para los puntos de 3 a 4.** Este segmento gira tangencialmente a la velocidad con que gira el rotor; el campo magnético  $\mathbf{B}$  es perpendicular a la superficie del rotor. Realizando el producto  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , tenemos que el voltaje inducido entre estos puntos será de polaridad opuesta a la del segmento 1 a 2

$$e_{12} = vBl \quad (1.5)$$

Este voltaje tiene valor nulo en los puntos donde se divide el polo positivo del negativo.

**Para los puntos de 4 a 1.** En este punto se debe observar que el producto  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  tiene un valor ya sea hacia dentro del rotor o hacia afuera del mismo; este valor será cero debido a que el vector resultante siempre será perpendicular a la longitud formada por estos puntos.

$$e_{41} = 0 \quad (1.6)$$

El voltaje total inducido en la espira será:  $\Sigma e = e_{\text{tot}}$

$$e_{\text{tot}} = e_{12} + e_{23} + e_{34} + e_{41} \quad (1.7)$$

$e_{\text{tot}} = 2vBI$ Frente a las caras polares.	(1.8)
$= 0$ En los puntos que dividen los polos	

Haciendo el análisis para el movimiento de la espira, ésta cambia de polo, es decir que cambia de norte a sur. Análogamente el voltaje se invierte, pero su magnitud se mantiene constante. Ver figura 3.

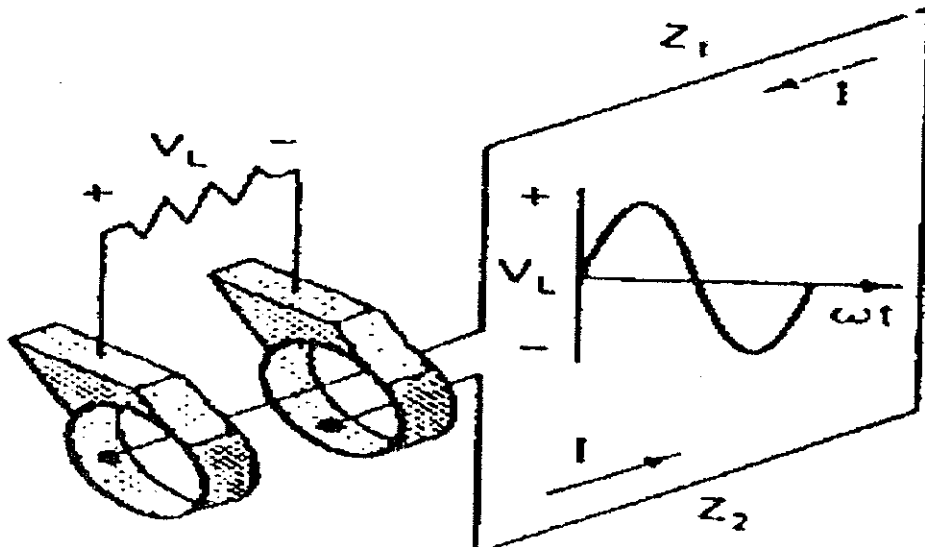


Figura 3, Voltaje inducido en una espira giratoria.

En base a las ecuaciones 1.9, 1.10, 1.11 se analizará el voltaje inducido.

$$V = rw \quad (1.9)$$

$r =$  radio del eje de rotación hasta la espira  
 $w =$  la velocidad angular de la espira

$$\begin{aligned}
 v &= \text{velocidad tangencial.} \\
 e &= 2 r l B w \\
 &\text{frente a la cara de los polos.}
 \end{aligned}
 \tag{1.10}$$

$$\begin{aligned}
 e &= 0 \\
 &\text{frente a los puntos que separan los polos.}
 \end{aligned}
 \tag{1.11}$$

Sea  $A$  el área del rotor  $A = 2\pi r l$   
 el área del rotor frente a cada polo es.  $A \approx \pi r l$   
 $p$

Entonces:

$$e_{\text{tot}} = \frac{2}{\pi} \frac{A}{p} B w
 \tag{1.12}$$

El flujo total bajo de cada polo será:

$$\phi = \frac{A}{p} B
 \tag{1.13}$$

$  e_{\text{tot}} = \frac{2}{\pi} \phi w \text{ frente a las caras polares.}  $	(1.14)
$  e_{\text{tot}} = 0 \text{ frente a los puntos que separan los polos}  $	

haciendo  $K = 2/\pi$

$  e_{\text{tot}} = K \phi w \text{ frente a las caras polares.}  $	(1.15)
$  e_{\text{tot}} = 0 \text{ frente a los puntos que separan los polos}  $	

La ecuación 1.15 nos dice que el voltaje interno, generado por esta máquina depende directamente del producto flujo y velocidad de rotación de la máquina.

En general en cualquier máquina eléctrica el voltaje depende de:

- 1.- El flujo magnético en la máquina.
- 2.- La velocidad de rotación.

3.- Una constante que depende de la construcción de la máquina.

### 1.2 Obtención de un voltaje de corriente directa.

Para obtener un voltaje de corriente directa a través de una espira giratoria, colocamos un anillo dividido en dos partes, en donde se tomará el voltaje por medio de dos puntos fijos, los cuales son de carbón (Ver figura 4); cada vez que el voltaje sea cero pondrá en corto circuito ambas partes del anillo y hará el cambio de conexiones y así se obtiene un voltaje positivo en uno de los lados, y el otro negativo. Al anillo fraccionado se le conoce como colector en las máquinas de corriente directa.

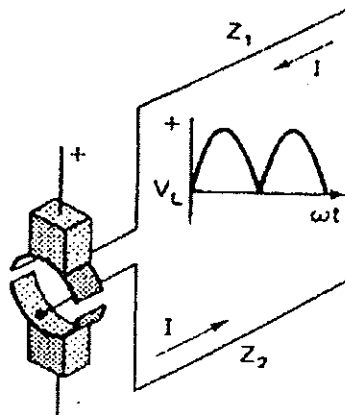


Figura 4, obtención de un voltaje de CD.

### 1.3 Par Producido Por La Espira Giratoria.

Al colocarle una fuente de corriente directa a la espira giratoria, como se mostró en la figura 4, se puede obtener el par producido por la espira. Se calculará por

cada segmento, luego lo sumaremos para obtener el par total. De la ecuación de la fuerza de Lorentz.

$$(F = q * v \times B).$$

$$F = i(l \times B) \quad (1.16)$$

$$T = r F \text{ Sen}(\phi) \quad (1.17)$$

El par siempre será cero en la parte de la espira que se encuentre fuera del alcance de la influencia de los polos y mientras la espira se encuentre frente a las caras polares, el par será, T. De la figura 2, se analizará la influencia de cada segmento de la espira.

**Segmento de 1 a 2.** En este segmento, la corriente está hacia afuera de la página y el campo magnético está radialmente saliendo del rotor; por lo tanto, la fuerza del conductor es.

$$F_{12} = i(l \times B) = ILB \quad (1.18)$$

tangente a la dirección del movimiento.

$$T_{12} = r i l B \quad (1.19)$$

**Segmento de 2 a 3.** En este segmento la dirección de l es paralela a B, por lo tanto.

$$F_{23} = i (l \times B) \quad (1.20)$$

$$F_{23} = 0 \quad T_{23} = 0$$

**Segmento de 3 a 4.** En este segmento  $\overrightarrow{\text{la corriente}}$  está hacia dentro de la página y el campo magnético está radialmente entrando al rotor; por lo tanto la fuerza del conductor es:

$$F_{34} = i (l \times B) = I l B \quad (1.21)$$

$$T_{34} = r i l B \quad (1.22)$$

34

Segmento de 4 a 1. En este segmento, la dirección de  $I$  es paralela a  $B$ , por lo tanto:

$$F_{41} = i(I \times B) \quad (1.23)$$

$$F_{41} = 0 \text{ entonces } T_{41} = 0$$

Por lo tanto el par resultante será:

$$T_{tot} = T_{12} + T_{23} + T_{34} + T_{41} \quad (1.24)$$

$$T_{tot} = \begin{cases} 2 r I B & \text{frente a los polos} \\ 0 & \text{en el eje interpolar} \end{cases} \quad (1.25)$$

puesto que  $A_p \approx \pi r l$ ,  $\phi = \frac{A}{p} B$  entonces:

$T_{tot} = \frac{2}{\pi} \phi I \text{ frente a las caras polares}$ $= 0 \text{ en los interpolos}$	(1.26)
---	--------

haciendo  $K = 2/\pi$

$T_{tot} = K \phi I \text{ frente a las caras polares}$ $= 0 \text{ en los interpolos}$	(1.27)
---	--------

La ecuación 1.27 establece que el par interno producido en una máquina es igual al producto de: flujo magnético, la corriente y a una cantidad que corresponde a las características mecánicas de su construcción (Ver figura 5).

En general, el par en una máquina real depende de tres variables:

1. El flujo magnético en la máquina.
2. La corriente en el interior de la máquina.
3. Una constante que depende de la construcción de la máquina (K).

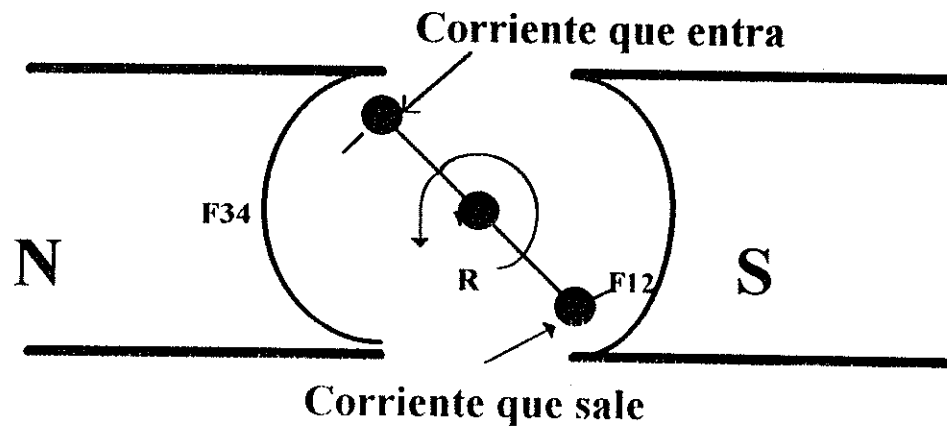
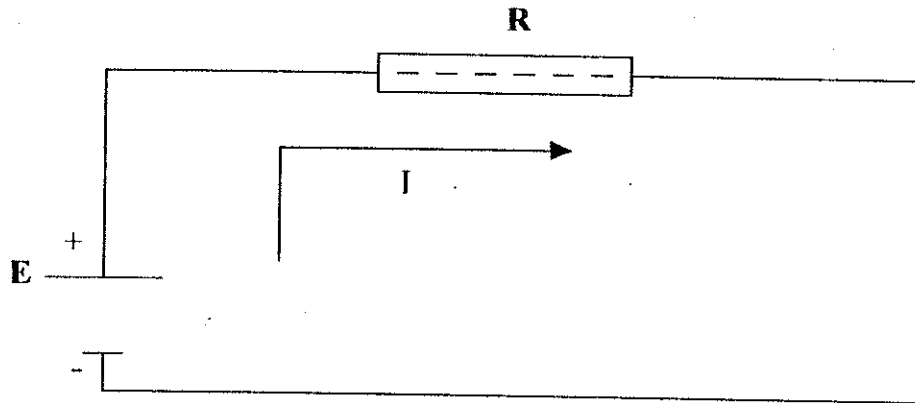


Figura 5, Par producido en la espira giratoria

#### 1.4.1 Reacción De Armadura.

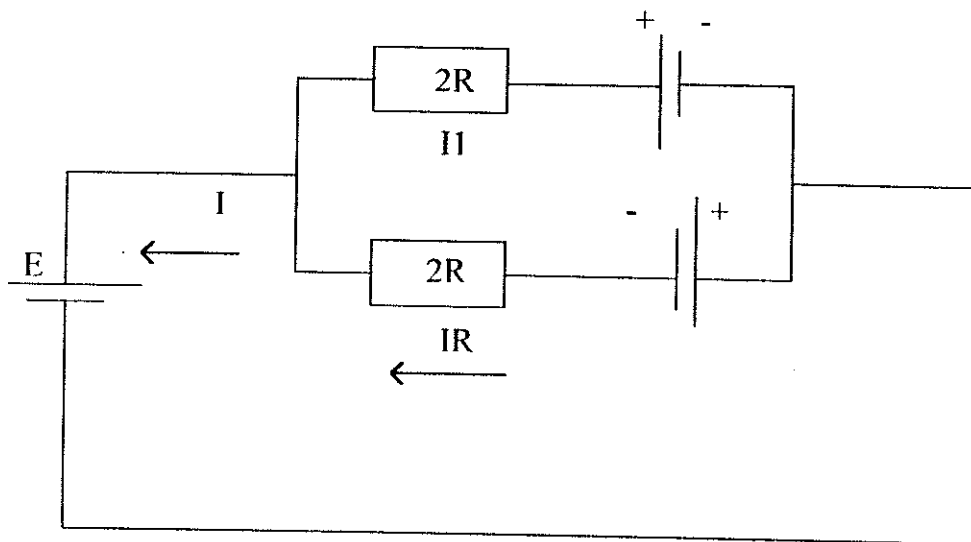
En una máquina de corriente continua con carga y con flujo de corriente ( $\phi_a$ ) en los conductores de armadura, el flujo de armadura cambiará de acuerdo con el aumento de  $I_a$ . Cuando un motor de CD se encuentra operando en vacío, el flujo de campo ( $\phi_f$ ), se encuentra en dirección del eje directo, donde el valor del flujo es máximo (d),  $\phi_a$  se encuentra en dirección del eje de cuadratura donde ocurre la conmutación (Ver figura 8); se puede observar en el polo sur en la primera mitad  $\phi_a$  se opone a  $\phi_f$ ; pero en la segunda mitad  $\phi_a$  se suma a  $\phi_f$ . En el polo norte, esta situación se invierte y se repite. Si trasladamos el flujo de ambos a densidad de flujo  $B$ , se puede graficar la suma de ambas, pero se hará suponiendo que el circuito magnético es lineal; entonces el flujo neto es  $\phi_f$ . En realidad, el circuito magnético no es lineal por lo que se debe analizar la curva de saturación; para ello se hará una analogía con un circuito eléctrico ( Ver figura 6).





**Figura 6,** Analogía de un circuito magnético por circuito eléctrico

Si dividimos exactamente la resistencia por la mitad, como lo indica la línea punteada en la figura 6, se tendrán dos resistencias con valor de  $2R$  ver figura 7, debido a que el área de cada resistencia se reduce a la mitad. Analizando el circuito siguiente.



**Figura 7,** Circuito equivalente eléctrico del circuito magnético.

$$I = I_1 + I_2 \quad (1.28)$$

$$I = (E - V)/2R + (E + V)/2R \quad (1.29)$$

$$I = E/2R - V/2R + E/2R + V/2R \quad (1.30)$$

$$I = 2E/2R \longrightarrow I = E/R \quad (1.31)$$

Que es la misma corriente que se obtuvo en el circuito simplificado; sustituyendo por las fuerzas magnetómotrices, tendremos un circuito equivalente donde;  $E$  es  $F_f$  y  $V$  es  $F_a$ , en cada una de las ramas en paralelo, tendremos  $F_f + F_a$  y  $F_f - F_a$ , añadiendo  $F_a$ , tendremos un aumento  $\Delta B$  y restando  $F_a$ , tendremos una disminución de  $\Delta B$ ; la magnitud de la disminución es mayor que la magnitud del aumento figura 8. Adicionalmente en la figura 9, se muestra el flujo de campo, flujo de reacción de armadura y la curva ya corregida, la cual se representa con líneas punteadas.

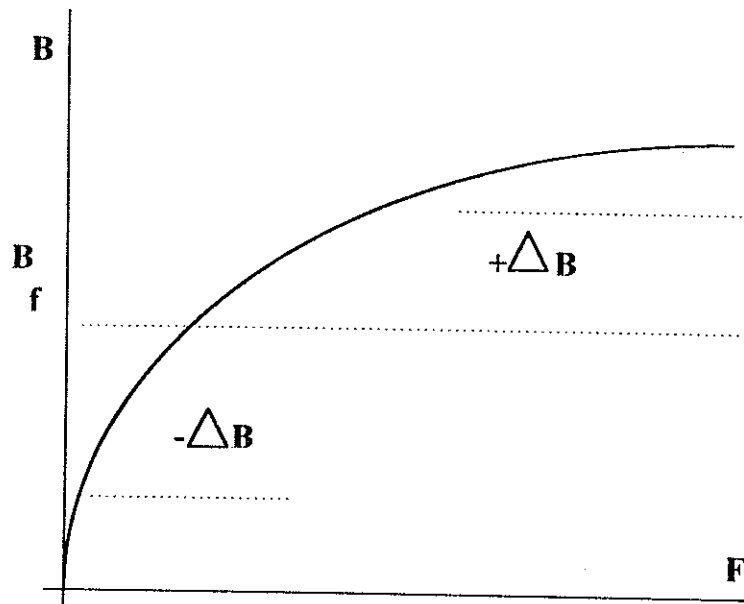
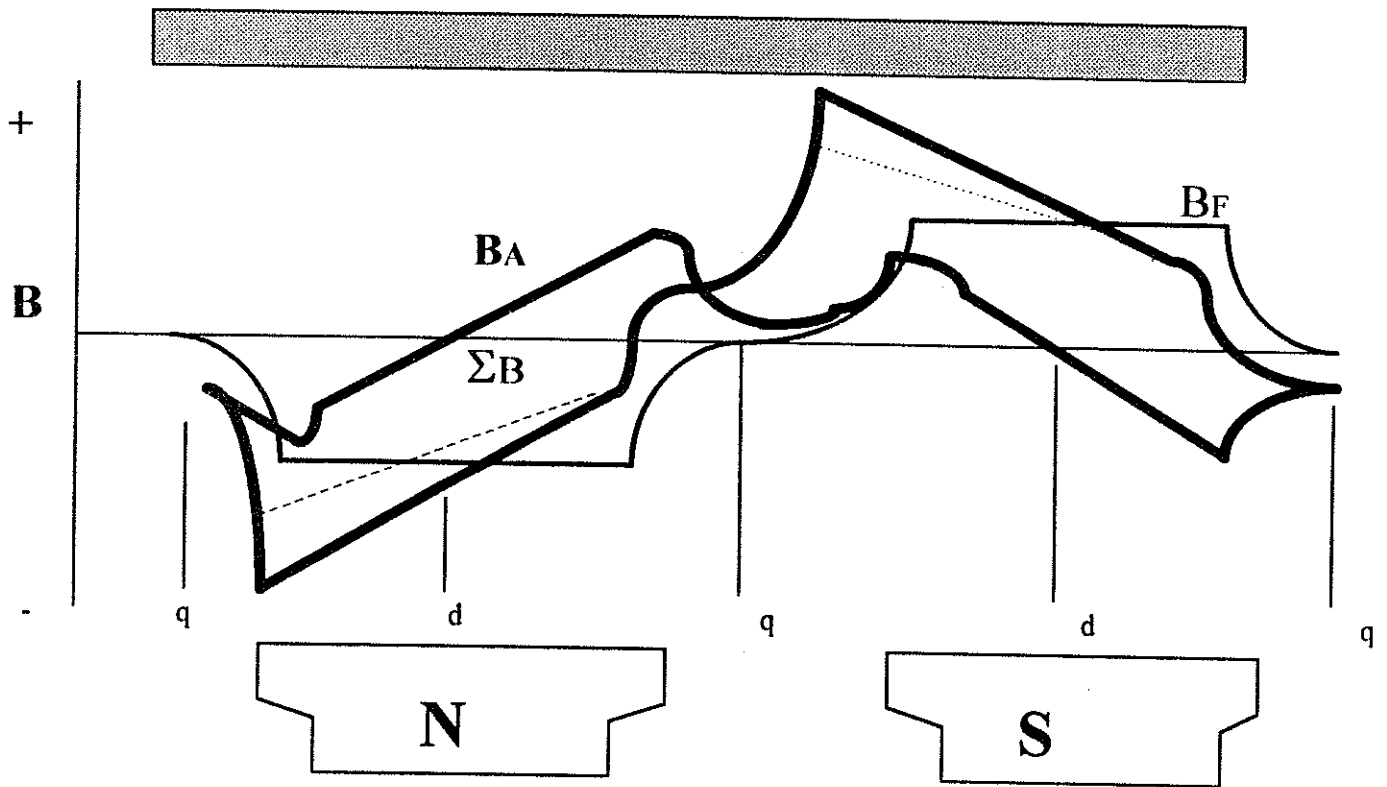


Figura 8, Curva de Saturación motor CD



**Bf = flujo de campo.**

**Ba = Flujo debido a la reacción de armadura.**

**$\Sigma B$  = Flujo resultante.**

**Figura 9, Distribución de flujo en el entrehierro.**

#### 1.4.2 Eje Directo D Y Cuadratura Q.

Probablemente más importante que el voltaje inducido en la armadura es la deformación de la forma de onda del voltaje atribuible al flujo deformado. En el punto en que  $B$  llega a su valor máximo, el voltaje inducido es mucho mayor que el voltaje inducido en una distribución normal; esto puede ocasionar grandes daños debido a que los extremos de las bobinas son conectados a elementos conmutadores (colector), separados por un pequeño entrehierro que puede causar arcos entre cada delga, e inclusive causar arcos entre todas las delgas y producir un cortocircuito entre el positivo y el negativo de cada escobilla y destruir la armadura.

La reacción de armadura es el establecimiento de flujo en la zona neutra o conmutatriz en las áreas de la vecindad del eje de cuadratura y la circunferencia de la armadura.

Cuando un conductor cruza el eje de cuadratura, la corriente de ese conductor debe cambiar de dirección; la reacción de armadura en la zona neutra induce voltajes lo cual agrava el problema de la conmutación.

Si no se corrige la reacción de armadura, también se creará un corrimiento del eje de cuadratura  $q$ , es decir el punto donde la corriente es igual a cero y ocurre la conmutación, por lo tanto, las escobillas estarán en un punto en que las corrientes serán distintas de cero, la combinación de  $\phi_f$  y  $\phi_a$  producen un  $\phi_r$ , lo que ocasionará un corrimiento del eje directo  $d$ , -es decir el punto donde el valor del flujo será máximo, en una máquina ideal-, de  $d$  hasta  $d'$  y de  $q$  a  $q'$ ; este corrimiento siempre será en la dirección de la rotación de armadura (Ver figura 10), pero la varia con los cambios de  $I_a$ , por lo que el desplazamiento no es constante. En la forma óptima, las escobillas se sitúan sobre el eje  $q$ .

Para eliminar la reacción de armadura se requiere:

- 1.- Eliminar el flujo en la zona neutra.
- 2.- Restauración del flujo neto en el eje directo.

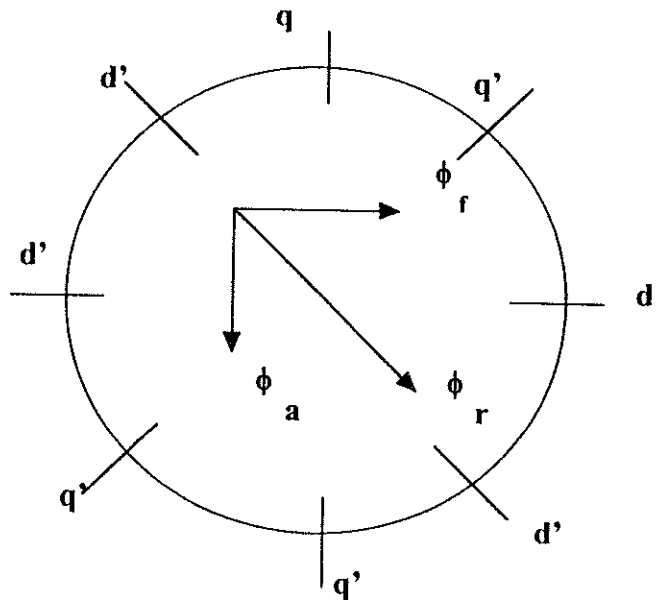


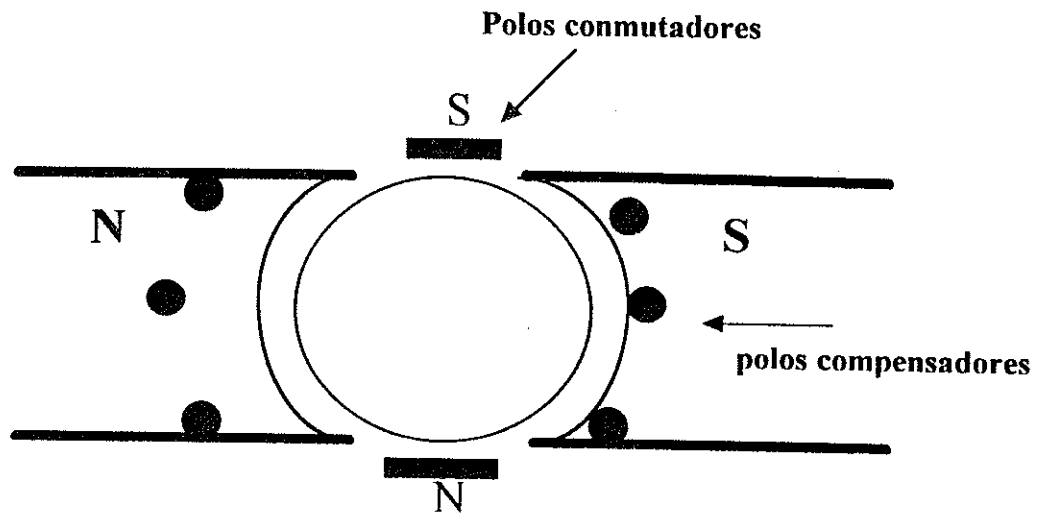
Figura 10, Corrimiento del eje directo y de cuadratura.

**1.4.3 Polos de conmutación.** Si colocamos polos pequeños entre los polos de campo de tal forma que se opongan al flujo de reacción de armadura y elimine bajo cualquier condición de carga, estos polos eliminan el flujo en la zona de conmutación, pero no corrigen la forma de campo distorsionada. A estos polos se les llama **Polos de conmutación o conmutadores.**

#### 1.4.4 Polos de compensación.

Para eliminar la forma de campo distorsionada, se colocan polos compensadores directamente en las zapatas de los polos de campo; estos se conectan en serie con la armadura, de tal forma que circule una corriente igual pero opuesta a la misma, la cual produce un flujo opuesto al de reacción de armadura, y deja un flujo resultante igual a cero. (Ver figura 11)

A estos polos se les denomina **polos compensadores**.



**Figura 11, Ubicación de Polos Compensadores y conmutadores.**

#### 1.4.5 Devanado de armadura.

En la figura 12 se ilustra la construcción del rotor, en el cual el núcleo está constituido por láminas de acero en el que existen ranuras en el que se insertan las bobinas de armadura. En cada ranura va insertada una parte de la bobina, que van interconectadas al conmutador, el cual consiste en varios segmentos aislados entre sí, y cuales forman un anillo fraccionado en donde se desliza las escobillas (carbones); éstas por lo general son construidas de carbón y grafito, no rotan; y son fijadas por medio de un resorte que mantienen determinada presión para mantener el contacto eléctrico.

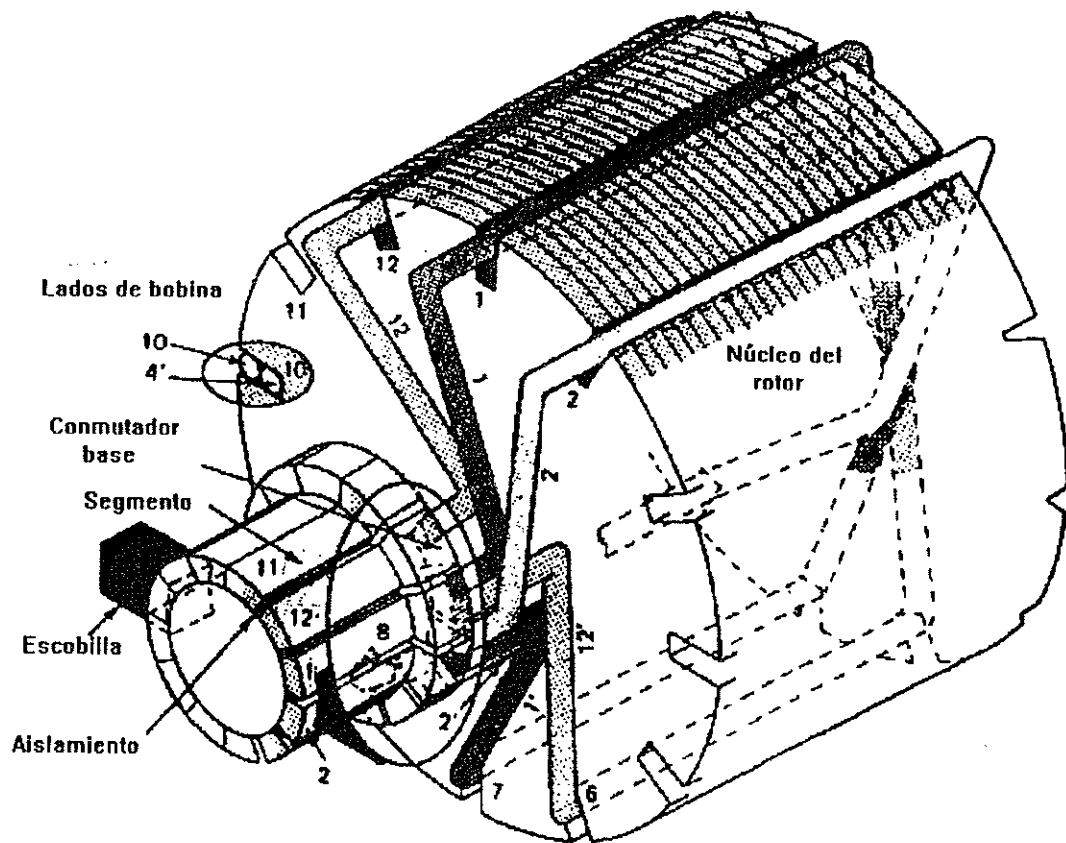


Figura 12, devanado de armadura

Las conexiones de las bobinas de armadura se hacen con base en la escogencia de los segmentos del conmutador, a los cuales se conectan los extremos de las bobinas; en la figura 13, se representan las conexiones para una máquina de dos polos: el Simplex, Dúplex, Tríplex.

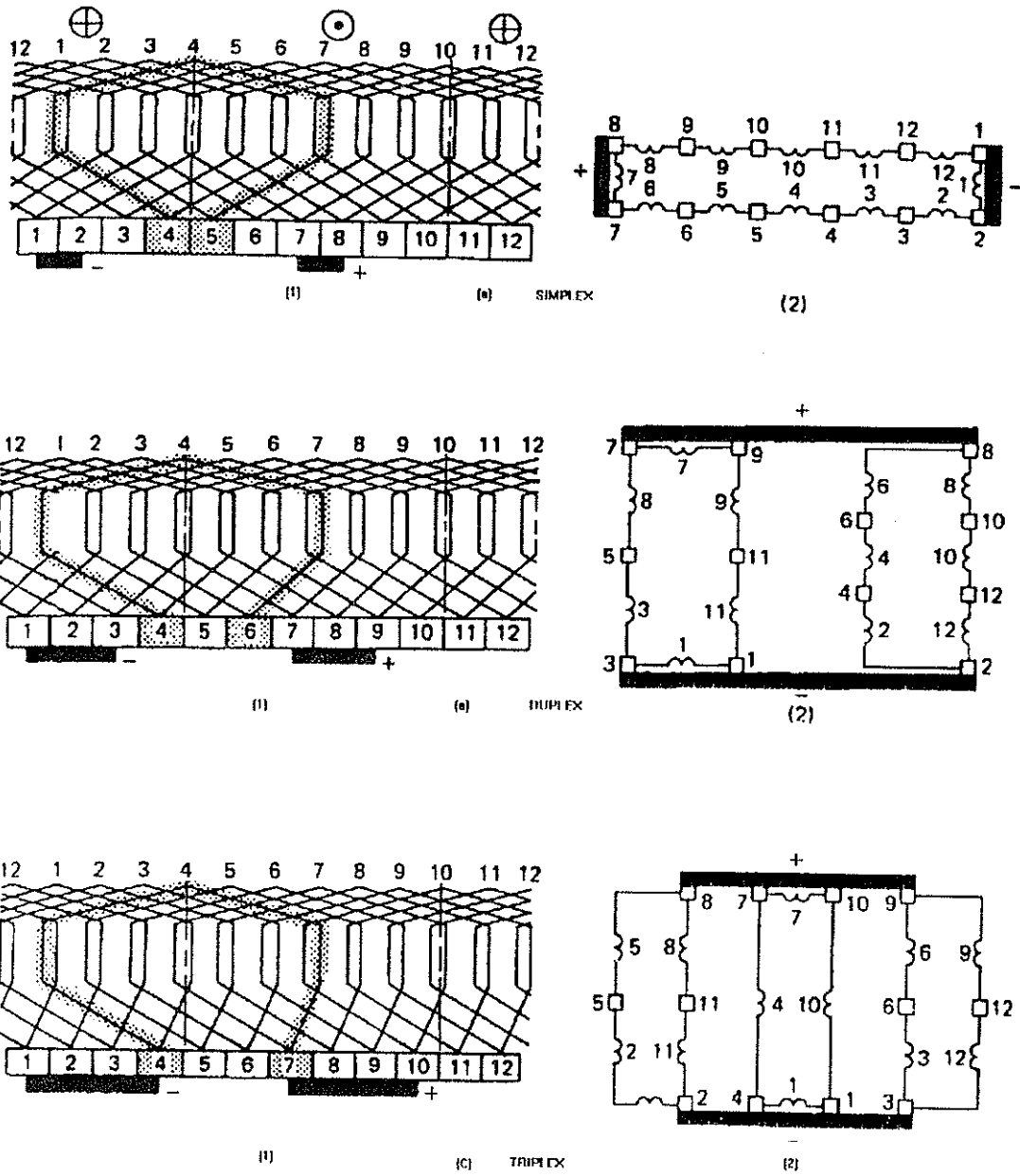


Figura 13, Conexiones en devanado de armadura, (a) Símplex, (b) Dúplex, (c) Tríplex



#### 1.4.6 La Conmutación.

Es el proceso de convertir los voltajes de corriente alterna a directa, al aplicar un voltaje de corriente directa en el conmutador de un motor de CD; la corriente en una bobina sujeta a conmutación cambia de dirección en el momento que la escobilla se mueve de una delga a otra; en este momento el valor de corriente debe ser cero, para una conmutación ideal, pero lo que en la realidad sucede es que la bobina en conmutación tiene alguna inductancia  $L$ ; el cambio de corriente  $\Delta I$  en un tiempo  $\Delta t$ , induce un voltaje  $L \Delta I / \Delta t$  en la bobina; de acuerdo a la ley de Lenz, este voltaje inducido se opone al cambio  $\Delta I$  que lo está produciendo. En consecuencia la corriente no se invierte por completo cuando la escobilla pasa de una delga a otra, que hace que la corriente no conmutada salte en forma de chispa entre la delga y escobilla.

En el momento de la conmutación, en el área de contacto de las escobillas y las delgas de conmutación, una área disminuye mientras que la otra aumenta. La resistencia varía inversamente proporcional con el área; la división de corriente varía inversamente proporcional con el área y, por lo tanto, directamente proporcional al área de contacto. La corriente en conmutación estará retrasada respecto a la curva ideal de conmutación. (Ver figura 14)

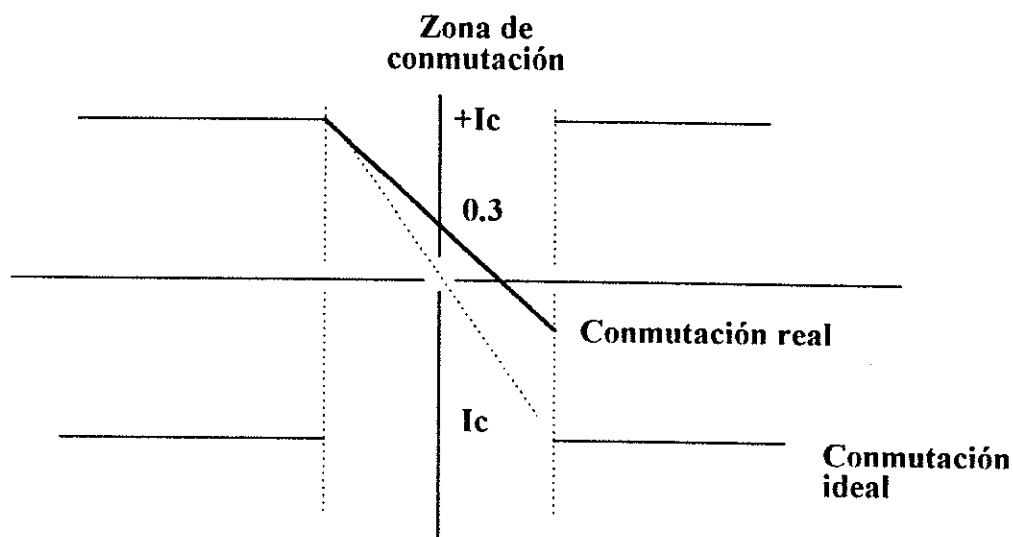


Figura 14, Retraso en la conmutación

Una forma de eliminar este problema es aumentar la resistencia de contacto entre el segmento y la escobilla, así el retraso será menor. Una mejor forma de eliminar este retraso es eliminando el voltaje reactivo de la bobina, haciendo producir un voltaje igual pero de polaridad opuesta al inducido; lo cual requiere un flujo de magnitud y polaridad adecuada sobre el eje de cuadratura. Esta forma es por medio de polos compensadores, los cuales se describieron anteriormente.

### 1.5 Motores de corriente directa:

Como ya se ha estudiado anteriormente, los motores de corriente directa son usados con gran frecuencia y especialmente en procesos donde se requiere el control de velocidad en rangos amplios de variación; estos motores se alimentan de una fuente de corriente continua y a la vez es la que controla la velocidad y par del mismo. Por lo general en la actualidad, son circuitos rectificadores de estado sólido y circuitos troceadores para crear la potencia necesaria en la carga. (Ver figura 15)

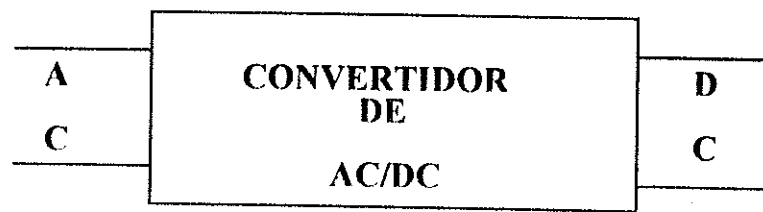


Figura 15, Diagrama de bloques de un convertidor de CD.

Los motores de corriente directa se comparan por su regulación de velocidad. La regulación de velocidad de un motor de corriente directa se define por las ecuaciones 1.32 y 1.33.

$$\text{REG. VEL} = \frac{(\omega_{sc} - \omega_{cc})}{\omega_{cc}} \times 100\% \quad (1.32)$$

$$\delta \quad \text{REG. VEL} = \frac{(n_{sc} - n_{cc})}{n_{cc}} \times 100\% \quad (1.33)$$

sc = sin carga  
cc = con carga

w = velocidad angular  
n = velocidad angular

Los motores de corriente directa se clasifican de acuerdo con las interconexiones entre los devanados de armadura, campo y campo compuesto. En esta clasificación, se encuentra:

1. **Excitación independiente.**
2. **Derivación.**
3. **De campo de imanes permanentes.**
4. **Serie.**
5. **Excitación compuesta.**

En el circuito equivalente de un motor de corriente directa, las ecuaciones básicas del motor de corriente directa son las mismas que en un generador de corriente directa del análisis del generador se tiene:

El voltaje inducido en la armadura es:

$$E_a = K \phi w \quad (1.34)$$

Y el par producido:

$$T_{pro} = K \phi I_A \quad (1.35)$$

$$P = V I = T w \quad (1.36)$$

### 1.5.1 motor con excitación independiente:

Se debe su nombre a que la alimentación se hace desde una fuentes independientes, para el campo y armadura. (Ver figura 16)

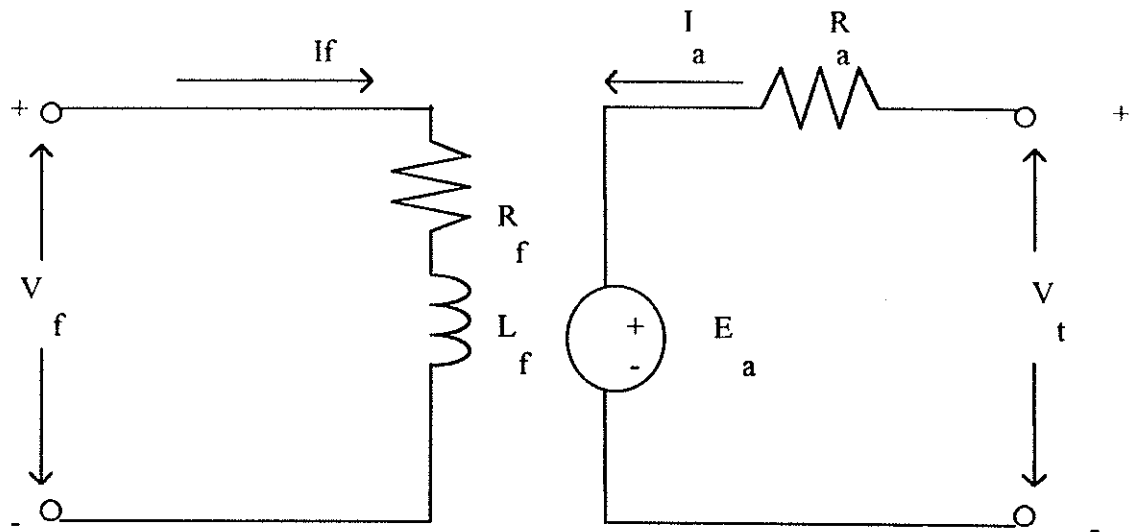


Figura 16, Motor con excitación independiente.

$$I_f = V_f / R_f \quad (1.37)$$

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad (1.38)$$

$$T = K \phi I_a \quad (1.39)$$

$$V_t = K \phi \omega + T / K \phi \quad (1.40)$$

$$\omega = V_t / k\phi - T / (k\phi)^2$$

(1.41)

Se puede analizar la curva de velocidad versus par, y será una línea recta con pendiente negativa; la característica de este motor es que tiene un par de arranque pobre, de la ecuación de velocidad se puede observar que cuando el motor se encuentre en vacío la velocidad será  $V_t / K\phi$ .

El comportamiento de un motor con excitación independiente es igual al de excitación en derivación.

### 1.5.2 Motor con excitación en derivación:

En la figura 17, se muestra el circuito para un motor derivación, en el cual el campo toma su voltaje de excitación directamente de las terminales de armadura; a este circuito también se le conoce como **Excitación en Paralelo**, el cual tiene las mismas características que un motor en excitación por separado. Por esa razón es por la que se analizará más a fondo este tipo de motor.

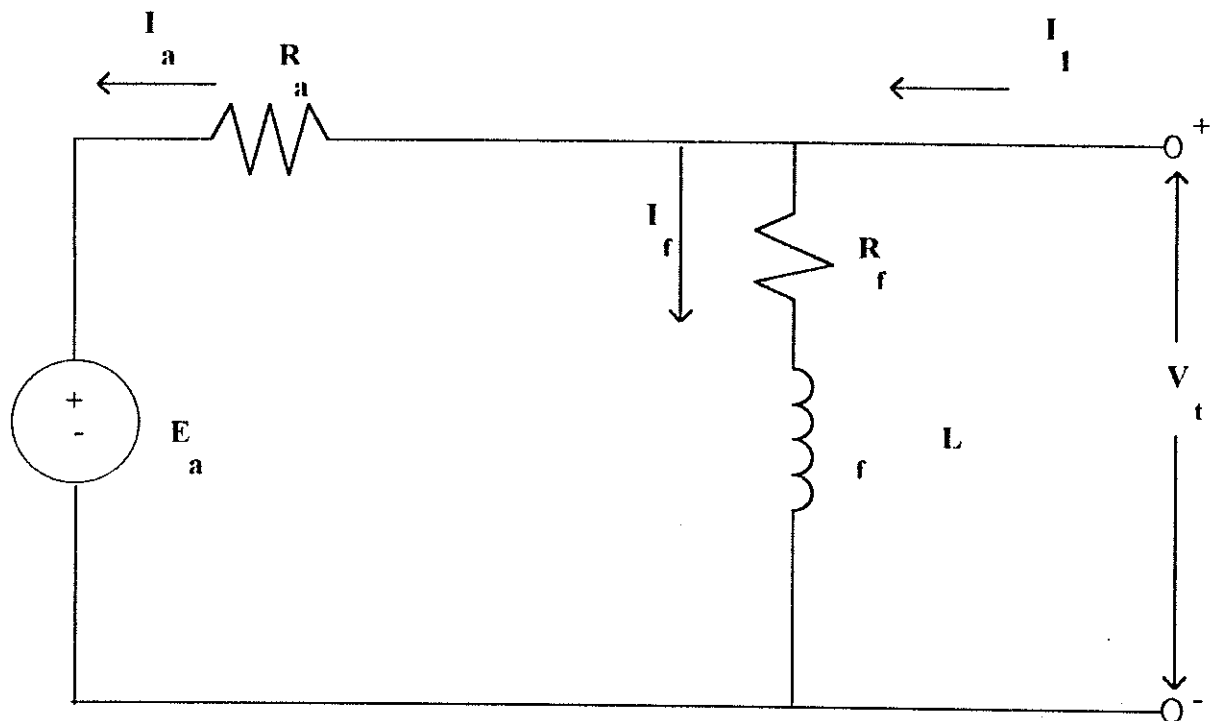


Figura 17, Motor con excitación en derivación o paralelo.

$$I_l = I_a + I_f \quad (1.42)$$

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad (1.43)$$

$$I_a = (V_t - E_a)/R_a \quad (1.44)$$

$$T = K \phi I_a \quad (1.45)$$

$$E_a = K \phi \omega \quad (1.46)$$

$$V_t = K \phi \omega + T/K \phi \quad (1.47)$$

$$W = V_t/K \phi - T/(K \phi)^2$$

(1.48)

Con base en la ecuación 1.48, se puede analizar la respuesta del motor derivación al aumento de carga, la velocidad disminuye y el voltaje generado en armadura baja  $E_a = K \phi \omega$ ; la corriente de armadura baja  $I_a = (V_t - E_a)/R_a$  y el par producido en el motor se incrementará  $T = K \phi I_a$ , hasta que el par producido sea igual al de la carga, pero con menor velocidad. (Ver figura 18) en un motor derivación con efecto de armadura, cuando se aumenta la carga, se tendrá una disminución en  $\phi$ , y en cualquier variación de la carga, la velocidad se incrementará; pero si la máquina está provista de polos compensadores, la reacción de armadura no afectará a la velocidad.

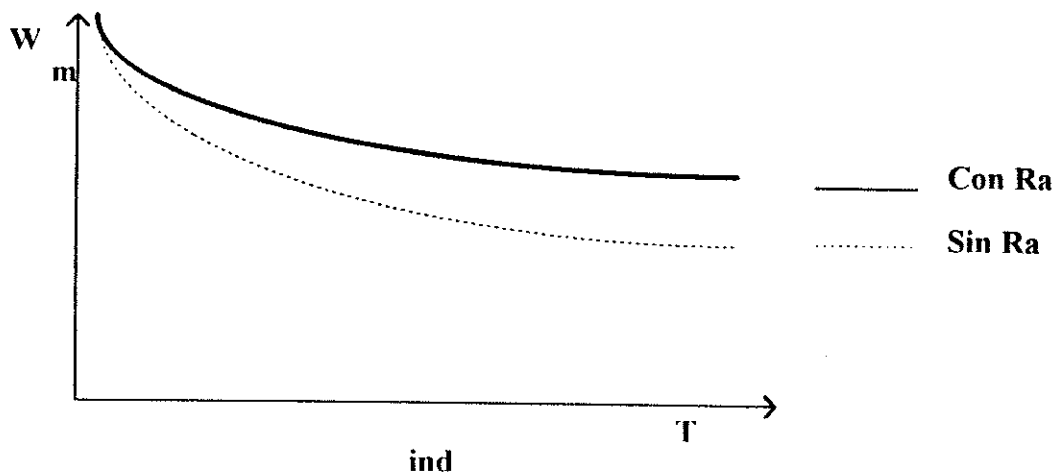


Figura 18. Característica par velocidad de un motor derivación.

### 1.5.3 Motor de excitación serie:

En el motor serie, está conectado, el campo en serie con la armadura; el devanado de campo contiene pocas espiras. (Ver figura 19)

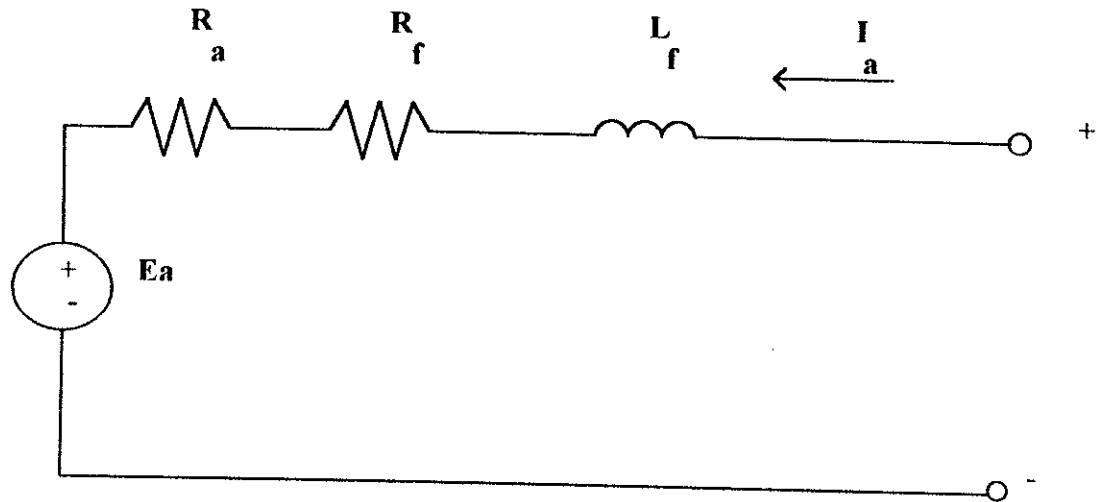


Figura 19, Circuito equivalente de un motor serie.

La característica principal de este motor es que el flujo en la máquina es directamente proporcional a la corriente de armadura. El par producido es:

$$T_{\text{ind}} = K \phi \omega \quad (1.49)$$

$\phi$  es directamente proporcional a la corriente de armadura:

$$\phi = C I_a \quad (1.50)$$

entonces:  $T_{\text{ind}} = K C I_a^2 \quad (1.51)$

Como se puede observar, el par inducido en el motor serie, es directamente proporcional a la corriente de armadura elevada al cuadrado; esto quiere decir que el par de arranque es bastante elevado; esta característica hace que el motor serie tenga muchas aplicaciones tales como: arranque de automóviles, en procesos donde la carga siempre está presente. El voltaje en las terminales del motor será:

$$V_t = E_a + I_a(R_a + R_f) \quad (1.52)$$

$$T = K C I_a^2; \quad I_a = \sqrt{T/KC} \quad (1.53)$$

$$E_a = K \phi \omega, \quad (1.54)$$

$$(1.55) \quad V_t = K \phi \omega + \sqrt{T/KC} * [R_a + R_f]$$

$$\text{si } I_a = \phi/C, \phi \quad T = K/C \phi^2, \text{ entonces } \phi = \sqrt{C/K} * \sqrt{T} \quad (1.56)$$

$$V_t = K \sqrt{C/K} * \sqrt{T} * \omega + \sqrt{T/KC} * [R_a + R_f] \quad (1.57)$$

$$KC \sqrt{T} \omega = V_t - (R_a + R_s) / \sqrt{kC} * \sqrt{T} \quad (1.58)$$

$$\omega = V_t / (\sqrt{KC} \sqrt{T}) - (R_a + R_s) / KC \quad (1.59)$$

En la 1.59 ecuación se puede observar que la velocidad varía con el inverso de la raíz cuadrada del par, suponiendo que el par sea cero, se tendrá una velocidad igual infinito; esto sería una condición ideal de figura 20, pero en la práctica esta ecuación está limitada por el efecto de saturación y las pérdidas del motor. La desventaja del motor serie es el hecho de que no se puede arrancar sin carga, ya que su velocidad sería extremadamente grande y podría dañarse; un motor serie no debe arrancarse sin carga e instalarse mecánicamente con fajas u otro mecanismo que pueda romperse; esto se hace con el fin de que el motor no se dañe al quedar sin carga.



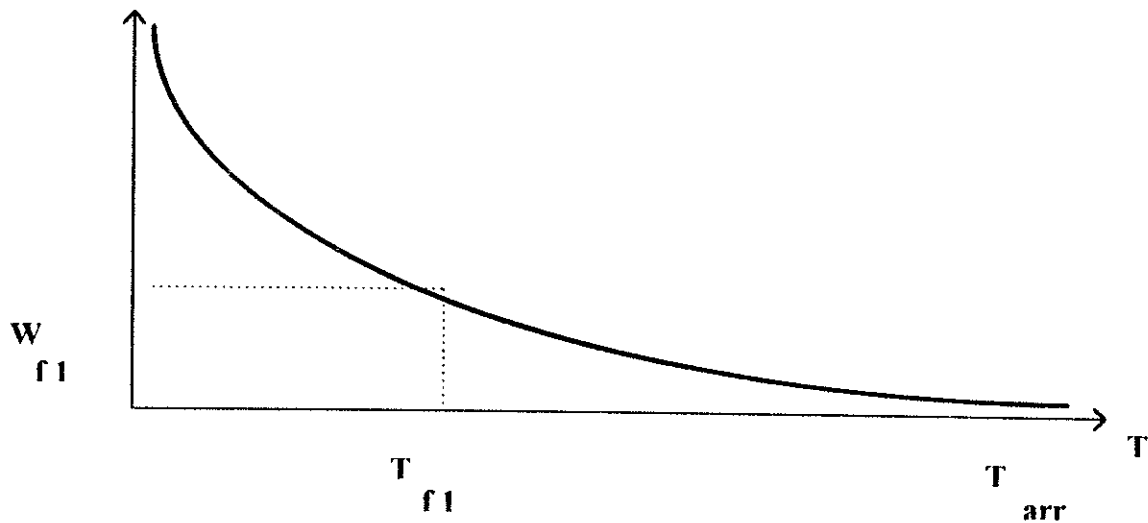


Figura 20, Curva característica de un motor serie.

#### 1.5.4 Motor compuesto.

El motor compuesto acumulativo es aquel que tiene sus campos en derivación y serie, y además utiliza un campo auxiliar, el cual mejora las características de un motor serie y derivación; hay dos tipos de motores compuestos en **derivación corta** y el otro en **derivación larga**. (Ver figura 21 y 22); el campo auxiliar puede ser excitado de tal forma que el flujo contribuya al flujo de campo, en este caso, sería un motor **compuesto acumulativo**; el otro caso es que el campo auxiliar contraresta los efectos del flujo; éste sería un motor en **compuesto diferencial**.

##### 1.5.4.1 Ventajas de un motor compuesto acumulativo.

- 1.- Tiene un par de arranque más grande que un motor en derivación, pero menor que un motor serie.
- 2.- A cargas ligeras el motor se comporta como un motor en derivación; el campo auxiliar tiene un efecto despreciable sobre el campo.
- 3.- Cuando la carga llega a tener valores considerables, el efecto del campo auxiliar llega a ser verdaderamente importante, y el motor se comporta como un motor serie.
- 4.- El motor compuesto acumulativo, tiene las mejores características de los motores de derivación y serie.

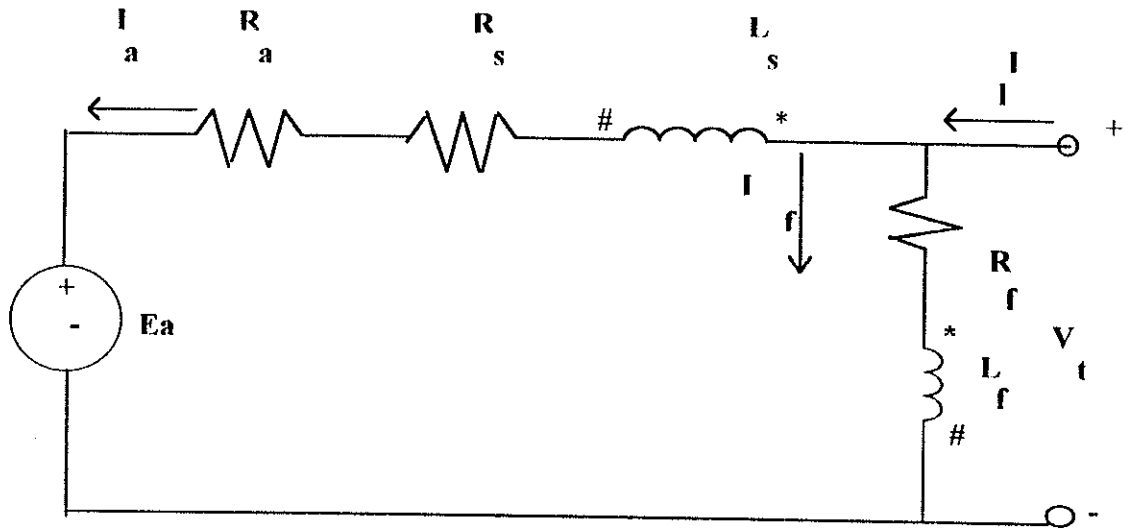
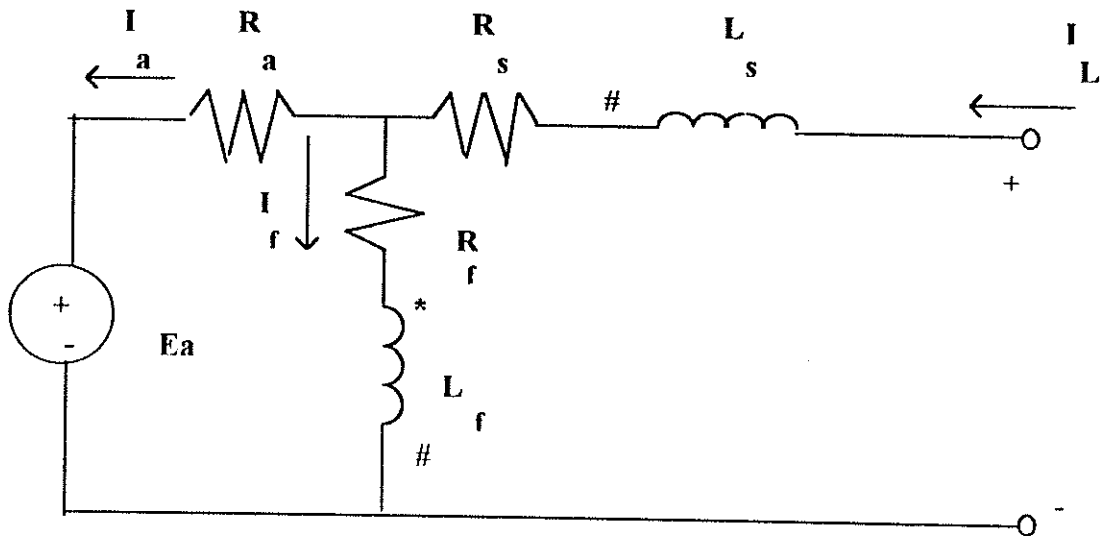


Figura 21, Motor compuesto con derivación larga.



\* = motor compuesto acumulativo.

# = motor compuesto diferencial.

Figura 22, Motor compuesto con derivación corta.

### 1.5.5 Motor compuesto diferencial.

En este motor, la fuerza magnetomotriz del campo y la fuerza magnetomotriz auxiliar serie se sustraen, lo que hace que el flujo total disminuya; esto provoca un aumento de la velocidad, lo que provoca un aumento en la carga y en  $I_a$ , y a su vez disminuye el flujo total, lo cual provoca nuevamente un aumento en la velocidad del motor. El resultado es que el motor compuesto diferencial es inestable y tiende a embalsarse, es decir que da un aumento de velocidad incontrolable.

El problema es mayor cuando se intenta arrancar un motor compuesto diferencial, pues que la corriente de arranque es extremadamente grande, ya que el flujo auxiliar en este momento es mayor que el flujo de campo, lo cual puede invertir la polaridad magnética de los polos, y el motor puede empezar a girar en sentido contrario y muy lentamente, y daña el motor por calentamiento.

Cuando en un generador la potencia fluye en sentido contrario, se creará un motor compuesto diferencial, por lo que los generadores deben ser protegidos en el cambio de flujo de potencia.

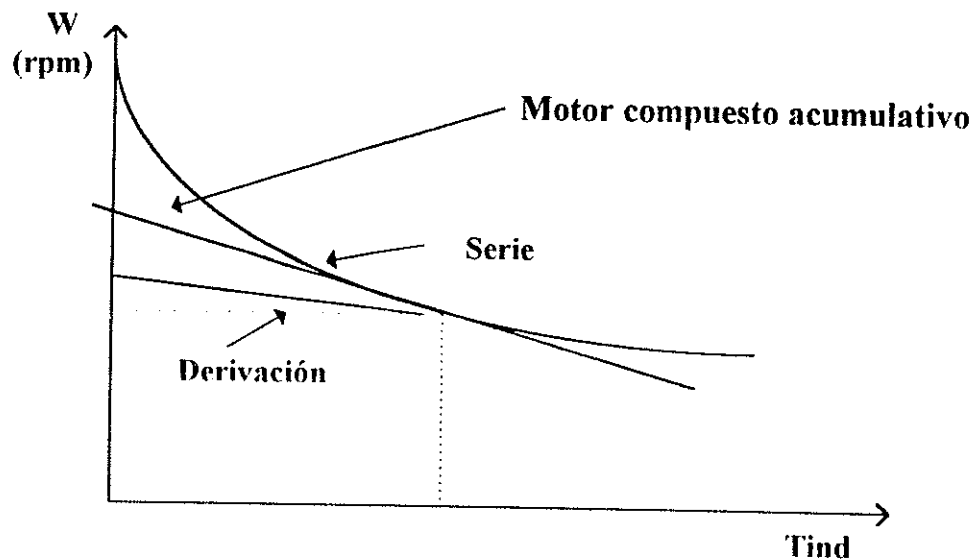


Figura 23, Características de par velocidad de un motor compuesto.

## CAPITULO 2

### ANÁLISIS DE TRANSITORIOS Y SISTEMAS DINÁMICOS DE CARGA EN UN MOTOR DE CD.

El motor de corriente continua se utiliza en sistemas que se necesita poder regular la velocidad y el par de salida. En la actualidad, se utiliza en la mayoría de los casos el motor de corriente directa con excitación independiente, manteniendo el campo constante y variando la tensión en la armadura. En el análisis de este caso, intervienen los transitorios eléctricos en el circuito inducido y la dinámica de la carga mecánica movida por el motor.

Para analizar los transitorios de una máquina de corriente directa, con base en las siguientes condiciones físicas, se hacen las siguientes suposiciones:

- 1.- La reacción de armadura es eliminada por los polos conmutadores y polos de compensación; no existe la autoinductancia entre campo y armadura.
- 2.- La conmutación es lineal.
- 3.- La inductancia de los embobinados de armadura y campo son constantes; esto quiere decir que son independientes de las corrientes que circulen por ellos.

#### 2.1 Ecuaciones dinámicas.

La relación electromecánica es establecida por el par magnético y la tensión inducida en la armadura.

$$T = K \phi I_a \quad (2.1)$$

$$E_a = K \phi_f w_a \quad (2.2)$$

$$E_a = K \phi_f i_f w_m \quad (2.3)$$

De la figura 24, obtendremos la tensión en el circuito de campo:

$$v_f = L_f \frac{di_f}{dt} + R_f i_f \quad (2.4)$$

$$v_f = L_f D i_f + R_f i_f \quad (2.5)$$

$$\text{siendo } D = \frac{d}{dt} \quad (2.6)$$

La tensión del circuito inducido es:

$$v_a = E_a + L_a D i_a + R_a i_a \quad (2.7)$$

$$v_a = K_f \phi f w + L_a D i_a + R_a i_a \quad (2.8)$$

La ecuación del par mecánico viene dada por:

$$T = K_f I_f i_a = J D w + T_l \quad (2.9)$$

$J$  = momento de inercia,

$T_l = B w$  par que se opone al movimiento.

éstas son ecuaciones diferenciales de primer orden, en las que se tomará como variables de estado el producto de  $i_f * w$ ,  $i_f * i_a$ .

## 2.2 Motor con excitación separada y con campo constante

De las ecuaciones anteriores, se puede deducir que las características de este motor depende específicamente de las variaciones de la corriente de armadura y la velocidad  $w$ . (Ver figura 24.)

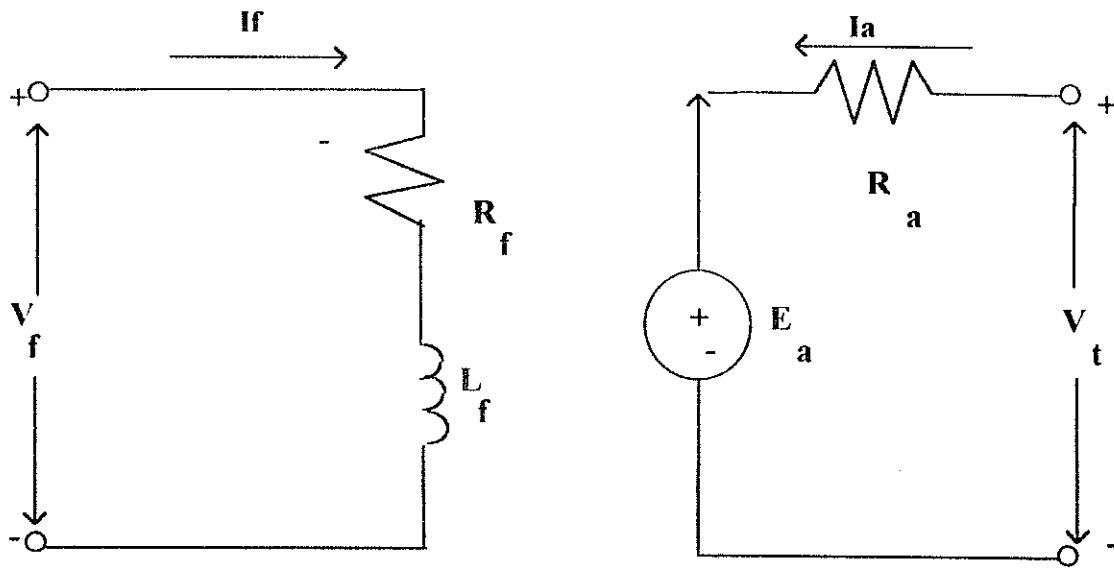


Figura 24, motor con excitación separada y con campo constante

$L_a$  = inductancia de armadura

$L_f$  = inductancia de campo

$L_{af}$  = inductancia mutua ficticia que relaciona el voltaje de la velocidad a la corriente de campo, la cual se determina de la porción lineal o no saturada.

$$e = \frac{\partial n \phi}{\partial t} = L_f \int \frac{\partial i}{\partial t} dt \quad (2.10)$$

integrando ambos lados

$$\int \frac{\partial n \phi}{\partial t} dt = L_f \int \frac{\partial i}{\partial t} dt \quad (2.11)$$

$$n \phi = L_f i \quad (2.12)$$

$$T = K \phi i_a = L_{af} \cdot I_f \cdot I_a \quad (2.13)$$

$$E_a = K \phi \omega = L_{af} \cdot I_f \cdot \omega \quad (2.14)$$

$$L_{af} = \frac{e_a}{I_f \omega} \quad (2.15)$$

en función de la curva de magnetización podemos definir **K**:

$$K = E_o / \omega_o, \quad [ \text{N.m} ] \quad (2.16)$$

la ecuación de corriente de armadura será:

$$v_a = E_a + L_a D i_a + R_a i_a \quad (2.17)$$

despejando  $i_a$  y sustituyendo  $E_a$ , tenemos.

$$i_a = \frac{(v_a - I_f L_{af} \omega)}{L_a D + R_a/L_a} \quad (2.18)$$

aplicando transformada de Laplace a ecuación 2.18:

$$i_a(s) = \frac{(v_a/S - I_f L_{af} \omega)}{S + R_a/L_a} \quad \begin{array}{l} \text{Corriente de} \\ \text{Armadura} \end{array} \quad (2.19)$$

Donde  $L_a/R_a = \tau$ , es la constante eléctrica de tiempo de este circuito. La ecuación de aceleración angular de este motor viene dada Por la ecuación 2.21.

$$T = K_f I_f i_a = J D \omega + T_l \quad (2.20)$$

$$D \omega = T/J - T_l/J = (K \phi i_a)/J - T_l/J \quad (2.21)$$

para determinar la ecuación de velocidad se tendrá:

$$J D \omega + B \omega = K \phi i_a = T \quad (2.22)$$

despejando  $w$ , de la ecuación tenemos:

velocidad angular

$$w = \frac{(Laf If ia / j)}{(D + B/J)} \quad (2.23)$$

Velocidad angular

$$w(s) = \frac{(Laf If/J) ia(s)}{(S + B/J)} \quad (2.24)$$

sustituyendo 2.24 en la 2.19 tenemos:

$$ia(s) = \frac{(Va/La) (S+B/J)}{S(S^2 + S(B/J + Ra/La) + (Ra B / LaJ + If^2 Laf / LaJ))} \quad (2.25)$$

ahora se encontrarán las raíces de:

$$S^2 + S(B/J + Ra/La) + (RaB/LaJ + If^2Laf/LaJ) \quad (2.26)$$

como sabemos que  $AS^2 + BS + C = 0$

$$X1, X2 = \frac{-B \pm \sqrt{(B^2 - 4AC)}}{2A} \quad (2.27)$$

$$X1, X2 = \frac{-(B/J + Ra/La) \pm \sqrt{[(B/J + Ra/La)^2 - 4(1) (RaB/LaJ + If^2Laf/LaJ)]}}{2A} \quad (2.28)$$

$$ia(s) = \frac{Va/La (S + B/J)}{S (S-X1) (S-X2)} \quad (2.29)$$



La ecuación 2.29 se puede descomponer en los siguientes términos:

$$i_a(s) = \frac{C_1}{S} + \frac{C_2}{S - X_1} + \frac{C_3}{S - X_2} \quad (2.30)$$

donde  $C_1, C_2, C_3$  se encuentran de la siguiente forma:

$$C_1 = \left. \frac{Va/La (S + B/J)}{(S - X_1)(S - X_2)} \right|_{S=0} = \frac{Va/La (B/J)}{X_1 X_2} \quad (2.31)$$

$$C_2 = \left. \frac{Va/La (S + B/J)}{S (S - X_2)} \right|_{S=X_1} = \frac{Va/La (X_1 + B/J)}{X_1 (X_1 - X_2)} \quad (2.32)$$

$$C_3 = \left. \frac{Va/La (S + B/J)}{S (S - X_1)} \right|_{S=X_2} = \frac{Va/La (X_2 + B/J)}{X_2 (X_2 - X_1)} \quad (2.33)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace a la ecuación 2.30, suponiendo que las condiciones iniciales son cero.

$$i_a(t) = C_1 + C_2 \text{EXP}(X_1 t) + C_3 \text{EXP}(X_2 t) \quad (2.34)$$

Para encontrar la función de  $w$ , sustituiremos la ecuación 2.29 en la 2.24.

$$w(s) = \frac{(Laf \cdot If \cdot Va / (J \cdot La))}{S (S - X_1)(S - X_2)} \quad (2.35)$$

La ecuación anterior se puede descomponer en los siguientes términos:

$$w(s) = \frac{A1}{S} + \frac{A2}{S - X1} + \frac{A3}{S - X2} \quad (2.36)$$

$$A1 = \left. \frac{(Laf \cdot If \cdot Va / (J \cdot La))}{(S - X1)(S - X2)} \right|_{S=0} = \frac{(Laf \cdot If \cdot Va / (J \cdot La))}{X1 X2} \quad (2.37)$$

$$A2 = \left. \frac{(Laf \cdot If \cdot Va / (J \cdot La))}{S(S - X2)} \right|_{S=X1} = \frac{(Laf \cdot If \cdot Va / (J \cdot La))}{X1(X1 - X2)} \quad (2.38)$$

$$A3 = \left. \frac{(Laf \cdot If \cdot Va / (J \cdot La))}{S(S - X1)} \right|_{S=X2} = \frac{(Laf \cdot If \cdot Va / (J \cdot La))}{X2(X2 - X1)} \quad (2.39)$$

Aplicando transformada inversa de laplace a la ecuación 2.36, suponiendo que las condiciones iniciales son cero:

$$w(t) = A1 + A2 \text{EXP}(X1 t) + A3 \text{EXP}(X2 t) \quad (2.40)$$

### 2.3 Regulación de la velocidad en motores de corriente directa.

Por medio de métodos sencillos, se puede regular la velocidad del motor dentro de rangos relativamente amplios.

La velocidad base de un motor de corriente directa se define como la velocidad más baja a carga y voltajes nominales y con un incremento de temperatura.

De la ecuación de velocidad  $w = E_g / k\phi = (V - I_a \sum R\phi) / k$ , se sugiere la forma

para variar el motor; al variar la resistencia de armadura, tendremos una variación en la velocidad del motor, y también variando  $\phi$ , una velocidad variable.

### 2.3.1. Variación por control de armadura.

Esta aplicación es funcional en los motores **compuestos, shunt y de excitación independiente**. Esto está limitado por el voltaje nominal de las características del motor, ya que la corriente de armadura no puede variar más arriba de su carga nominal, ya que ocasionaría daños por calentamiento en las bobinas de armadura; la variación de la velocidad de armadura se logra por los siguientes métodos:

- 1.- Colocar una resistencia variable en serie con la armadura. (Ver figura 25)
- 2.- A través de una fuente de voltaje controlada en la armadura y manteniendo el voltaje de campo constante. En la actualidad, estas fuentes de voltaje variable son fabricadas por medio de dispositivos en estado sólido Tiristores.

**Resistencia variable:** aunque teóricamente se pueden obtener velocidades relativamente bajas, se tiene el problema de pérdidas de energía debido a la disipación de calor en estos elementos.

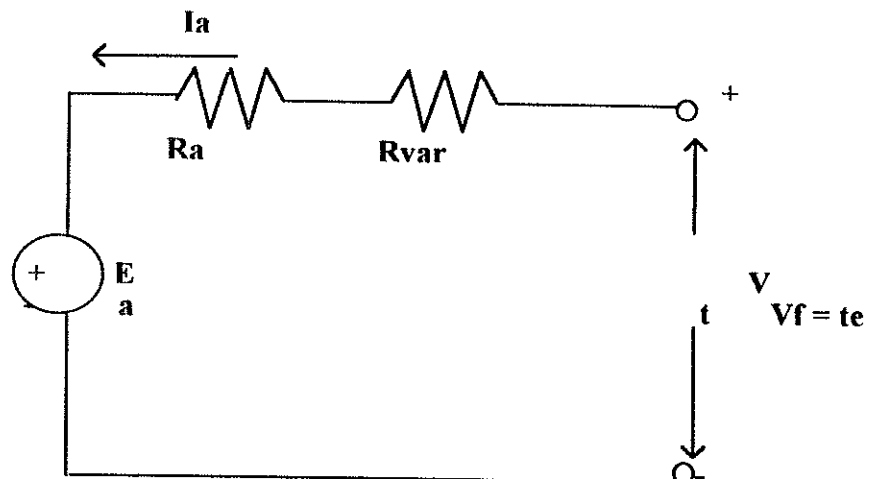


Figura25, Circuito con resistencia variable.

### 2.3.2 Control por campo.

La corriente nominal del campo no puede ser variada más allá de su valor nominal, por lo que esta corriente se disminuye con el objeto de bajar  $\phi f$ ; pero en este caso, la velocidad se varia encima de su velocidad nominal, por lo que en el motor se dan velocidades elevadas y debe ser capaz de soportar las velocidades altas con carga. Los motores de velocidad variable por control de campo son más grandes que un motor controlado por armadura. Por lo general, esta variación se realiza por medio de un voltaje variable en las terminales de la bobina de campo, y la corriente de armadura se mantiene constante. (Ver figura 26.)

En el control por campo, se tiene que tener cuidado para que no se interrumpa el circuito de campo y la velocidad aumente extremadamente, y se destruya por vibración (efecto de embalamiento).

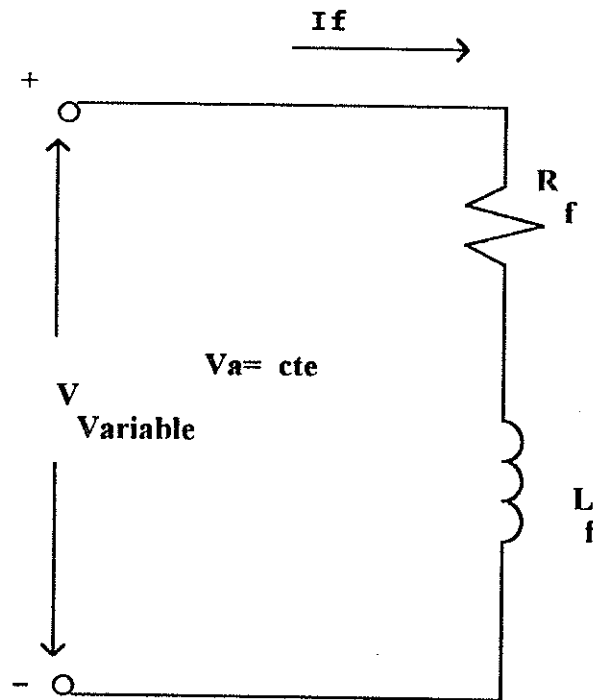
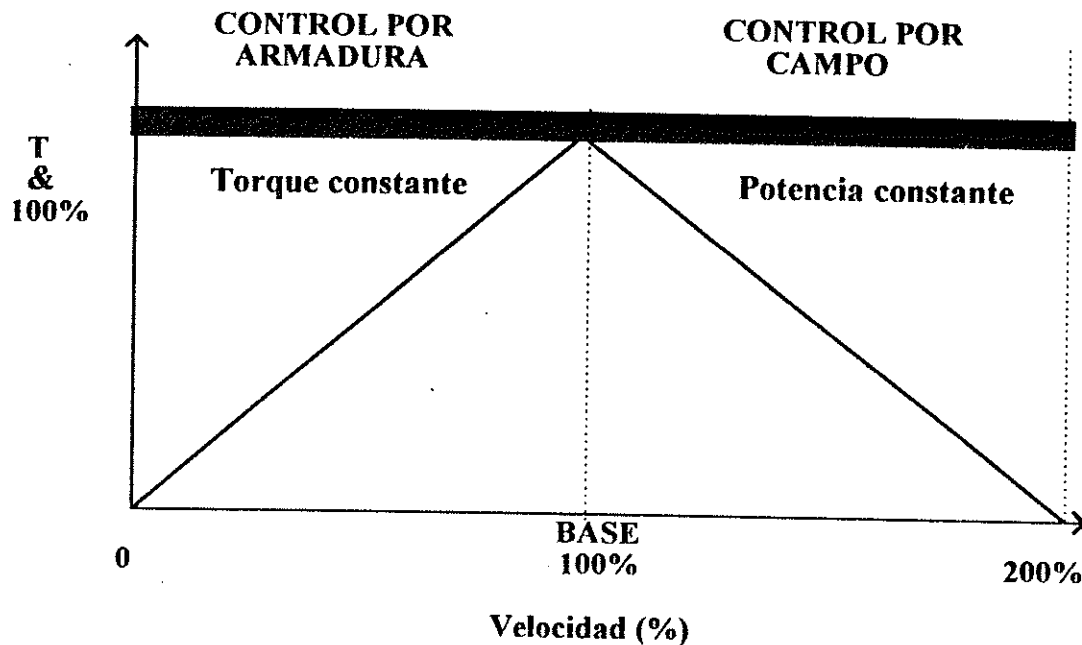


Figura 26, Circuito con campo variable

De lo anteriormente descrito, se puede definir que variación de velocidad por armadura en un rango de cero hasta la velocidad nominal del motor, a diferencia de uno controlado por campo que la velocidad mínima, es la nominal y la velocidad máxima es hasta el doble de la velocidad nominal. ( Ver figura 27)



**Figura 27, Características de velocidad control por campo y armadura**

La características principales de control por armadura son:

- 1.- Torque constante.
- 2.- Velocidad variable.

La características principales de control por campo son:

- 1.- Potencia constante.
- 2.- Velocidad variable.

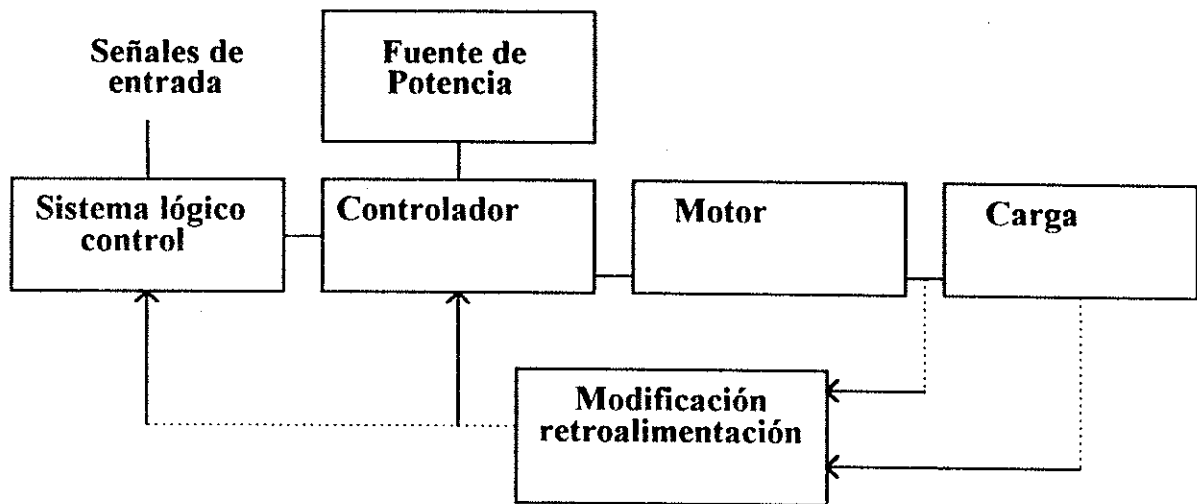
De lo anterior, se puede decir que la regulación de velocidad va a depender del tipo de proceso donde se aplique un motor de corriente directa y de la exactitud de la velocidad que necesite el mismo.

**CAPITULO 3**  
**ELECTRÓNICA DE POTENCIA EN MOTORES CD**

**3.1. Control electrónico de motores de corriente directa.**

Los parámetros que se deben controlar en un motor de corriente directa son: velocidad, el par, la aceleración y la potencia mecánica en la salida del motor (en la flecha).

El esquema básico electrónico para el control de motores eléctricos es representado en la figura 28.



**Figura 28,** Representación en bloques de un control electrónico.

Para obtener un voltaje variable en las terminales de armadura de un motor de corriente directa, se obtiene por medio de circuitos rectificadores, los cuales están diseñados para cortar una señal senoidal y distintos tiempos y rectificarla por medio de tiristotes llamados comúnmente SCR o rectificadores controlados de silicio, teniendo como base la ecuación del voltaje medio de una señal senoidal:

$$\Lambda \text{ prom} = \left[ \begin{array}{c} \phi_2 \\ 1/T \left\{ \int \Lambda_m \text{Sen}(\phi) \right\} \\ \phi_1 \end{array} \right] \quad (3.1)$$

$$A_{\text{prom}} = \frac{1}{T} \left\{ \int_{\phi_1}^{\phi_2} A m^2 \text{Sen}(\phi) \right\} \quad (3.2)$$

En la actualidad, son comunes los rectificadores trifásicos controlados por medio de SCR, (ver figura 29), en la variación de velocidad en motores de corriente directa. Es posible el cambio de velocidad al valor medio del voltaje aplicado a la armadura, que depende de los tiempos de conducción y no conducción del SCR.

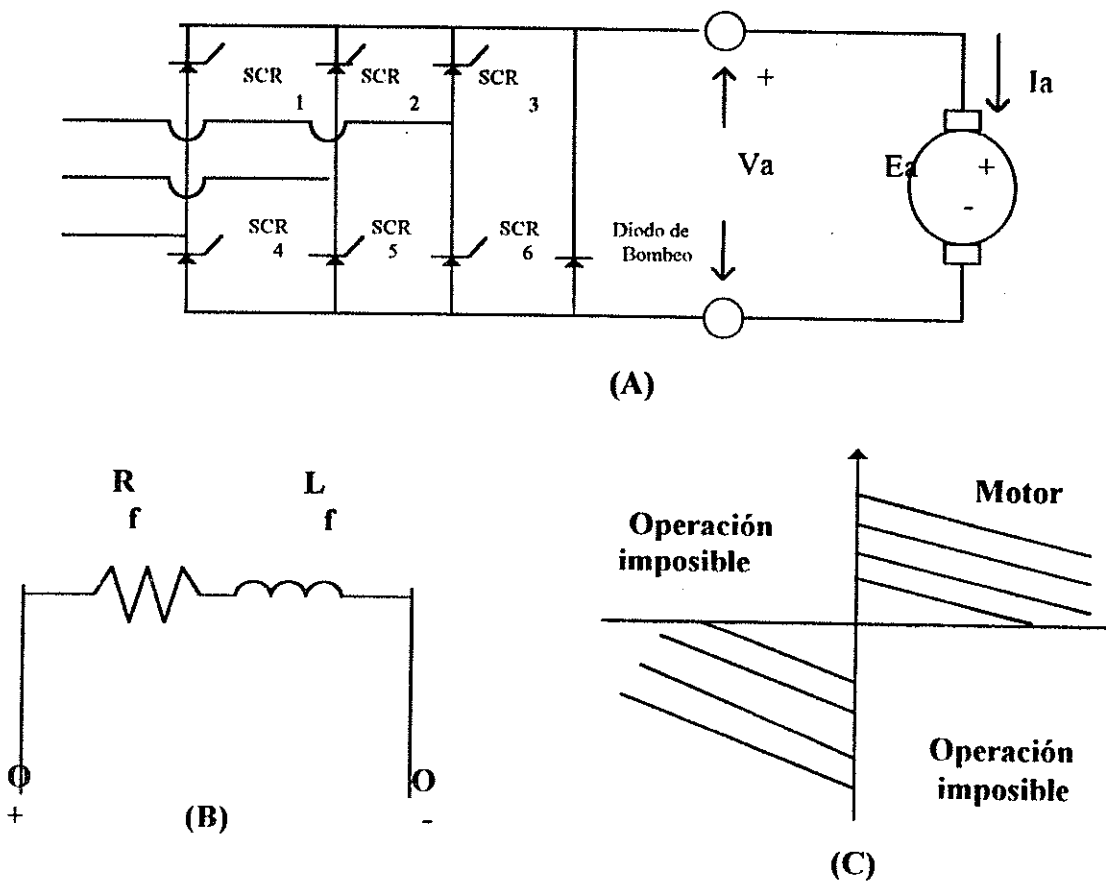


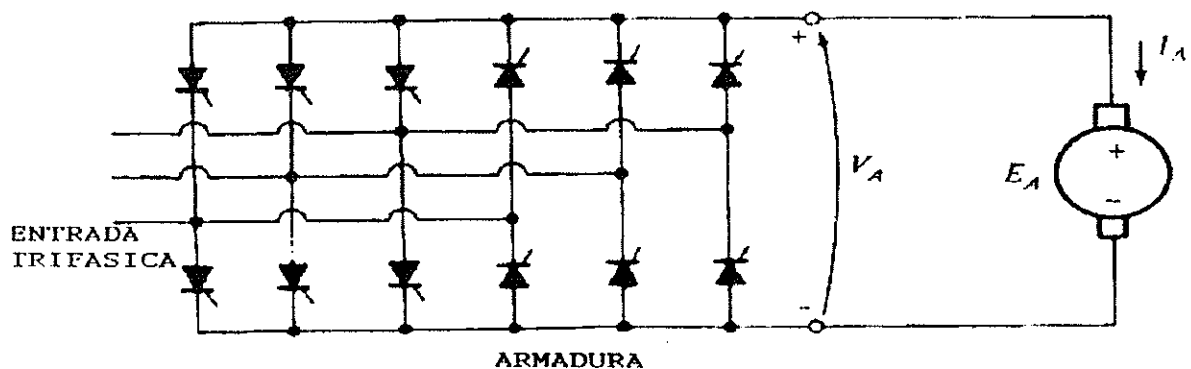
Figura 29, Circuito de controlador de velocidad, a) Circuito de armadura, b) Circuito de campo, c) Cuadrantes de operación

En la figura anterior, se puede observar cómo la corriente es rectificadora por medio de los tiempos de conducción y no conducción en los SCR.

En los tiempos de no conducción, la corriente de armadura circula por el diodo de bombeo D, hasta que la energía almacenada en la inductancia sea restituida al mismo inducido.

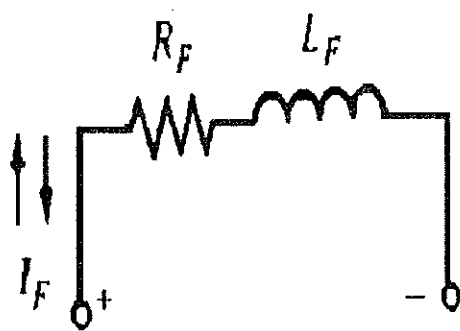
En este control, la corriente no puede fluir hacia el terminal positivo de la armadura; por lo tanto, este motor no puede funcionar como generador y devolver energía a la línea; a estos sistemas se les denomina **No-Regenerativos**. Las únicas posibles operaciones son en marcha normal y con giro cambiando; éste es un control de dos cuadrantes (Ver figura 29).

También existe otro tipo de controladores a los cuales se les denomina **Regenerativos**, los cuales tienen la propiedad de restituir potencia a la línea; esto sucede cuando el motor se comporta como generador; cuando el motor es desenergizado, la energía producida por la inercia es regresada al sistema a través del puente de tiristores; a diferencia del circuito anterior, éste tiene mayor número de tiristores y es un controlador de cuatro cuadrantes de operación (Ver figura 30), en donde se puede observar que trabaja como motor con posibilidades de cambio de giro y de generar en ambos sentidos de rotación. Este sistema resulta ser más costoso por su mayor número de componentes, pero es más económico en operación.

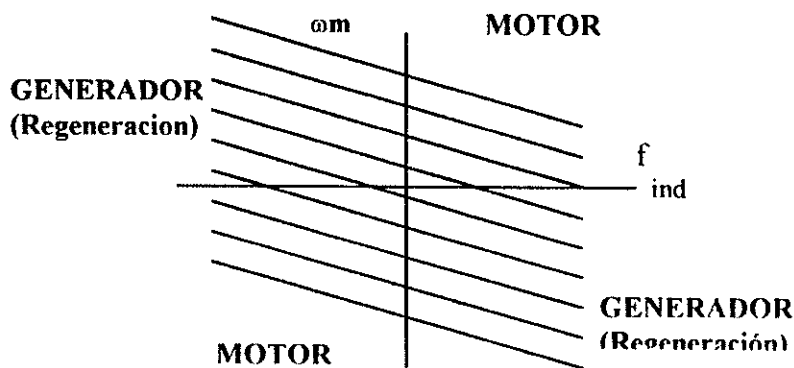


(A)





(B)



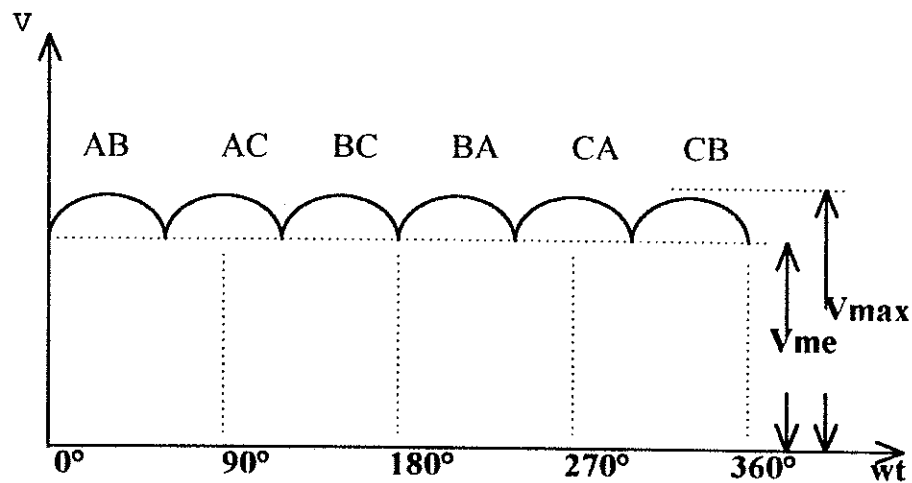
(C)

**Figura 30.** Circuito de un variador de velocidad del tipo regenerativo a) Circuito de armadura, b) Circuito de campo, c) Cuadrantes de operación.

### 3.2. Secuencia de disparo y dirección de la corriente en el controlador.

Haciendo referencia a la figura 29 y tomando el caso en que la rectificación (o conmutación) de onda es completa, tendremos: cuando la fase **C** es positiva respecto a la fase **B**, la corriente fluirá a través del tiristor **3**, a través de la carga y luego a través del tiristor **5**; cuando estos tiristores estén en la condición de disparo, cuando la fase **C** es positiva con respecto a la fase **A**, la corriente fluirá a través del tiristor **3**, a través de la carga y luego a través del tiristor **4**; cuando éstos estén en la condición de disparo, note que el tiristor **3** ha sido disparado dos veces, 60 grados aparte: una vez con el tiristor **5** y otra con el **4**; cuando la fase **B** es positiva respecto a la fase **A**, la corriente fluirá a través del tiristor **2**, a través de la carga y luego a través del tiristor **4**, cuando estos estén en la condición de disparo; cuando la fase **B** es positiva respecto a la fase **C**, la corriente fluirá a través del tiristor **2**, a través de la carga y luego a través del tiristor **6**; cuando éstos estén en la condición de disparo, note que el tiristor **2** ha sido disparado dos veces, 60 grados aparte, una vez con el tiristor **4** y otra con el **6**; cuando la fase **A** es positiva con respecto a la fase **C**, la corriente fluirá a través del tiristor **1**, a través de la carga y luego a través del tiristor **6**, cuando éstos estén en la condición de disparo; cuando la fase **A** es positiva respecto a la fase **B**, la corriente fluirá a través del tiristor **1**, a través de la carga y luego a través del tiristor **5**;

cuando éstos estén en la condición de disparo, note que el tiristor 1 ha sido disparado dos veces, 60 grados aparte, una vez con el tiristor 6 y otra con el 5. (Ver figura 31.)



$V_{me}$  = Voltaje medio.       $\alpha$  = Ángulo de disparo = 0

$V_{max}$  = Voltaje máximo.

**Figura 31, Forma de onda en la rectificación de una onda completa.**

Acerca de la secuencia de disparo descrita anteriormente, se pueden tabular las secuencias de disparo respecto a las fases:

TIRISTOR DISPARADO	CONDICIÓN DE LA LÍNEA
3-5 3-4	+C -B +C -A
2-4 2-6	+B -A +B -C
1-6 1-5	+A -C +A -B

### 3.3 Análisis matemático de un convertidor de corriente directa.

La conmutación de corriente de un dispositivo en particular, tiene lugar en un punto definido de la corriente alterna. En el análisis de convertidores de corriente directa, se hacen las siguientes suposiciones para simplificar los análisis matemáticos.

- 1.- La impedancia del sistema de corriente alterna es cero.
- 2.- La caída de voltaje directo en los dispositivos de conmutación es cero.
- 3.- La resistencia inversa de los dispositivos de conmutación es infinita.
- 4.- La inductancia del circuito de CD es muy grande, por lo que la corriente es constante.

Haciendo referencia al circuito de la figura 29, se puede deducir el voltaje de salida.

Sea  $V_{ab}$  el voltaje de entrada:

$$V_{ab} = \sqrt{2} V_L \cos(\omega t) \quad (3.4)$$

Cuando en un sistema trifásico se rectifica completo, la rectificación por onda ocurre cada 60 grados, entonces tenemos:

$$V_o = \frac{1}{2\pi/6} \int_{-(\pi/6)+\alpha}^{(\pi/6)+\alpha} \sqrt{2} * V_L \cos(\omega t) \quad (3.5)$$

$V_o$  = Voltaje de salida CD;

$V_L$  = Voltaje de línea AC;

$\alpha$  = Ángulo de disparo.

$$V_o = 3 * \sqrt{12} * \cos \quad (3.6)$$

$V_o = 1.35 V_L \cos$

(3.7)

Los tiempos de disparo de los tiristores pueden ser variados a través de la frecuencia del oscilador maestro o control de disparo, el cual controla el voltaje de armadura y la velocidad del motor a la vez. En la figura 32, se muestra la forma de onda del voltaje de salida de un puente controlado, para ángulos de disparo de 30°, 60°, 90°, 120° grados. En los circuitos controlados por tiristores, se necesita de un circuito de control de secuencias de fases o de sincronismo y de pérdida fase, ya que para el disparo de cada SCR viene diseñado de tal forma que los voltajes A,B,C sean recortadas de acuerdo con una determinada secuencia, de lo contrario daría resultados donde el voltaje de armadura sería incontrolable en estas circunstancias, y no se tendría estabilidad en el control.

Por lo general, un sistema de control para variar la velocidad de un motor de corriente directa viene compuesto de: control del operador, control de velocidad, control de corriente de armadura, detector de secuencia de fases o de sincronismo y un detector de pérdida de campo, oscilador o generador de pulsos, el cual controla las compuertas de disparo de cada tiristor del rectificador controlado, detector de secuencia de fases o de sincronismo, y un detector de pérdida de campo, así como de una señal de retroalimentación, la cual puede ser por medio de un tacómetro o una retroalimentación por armadura. (Ver figura 33 y 34)

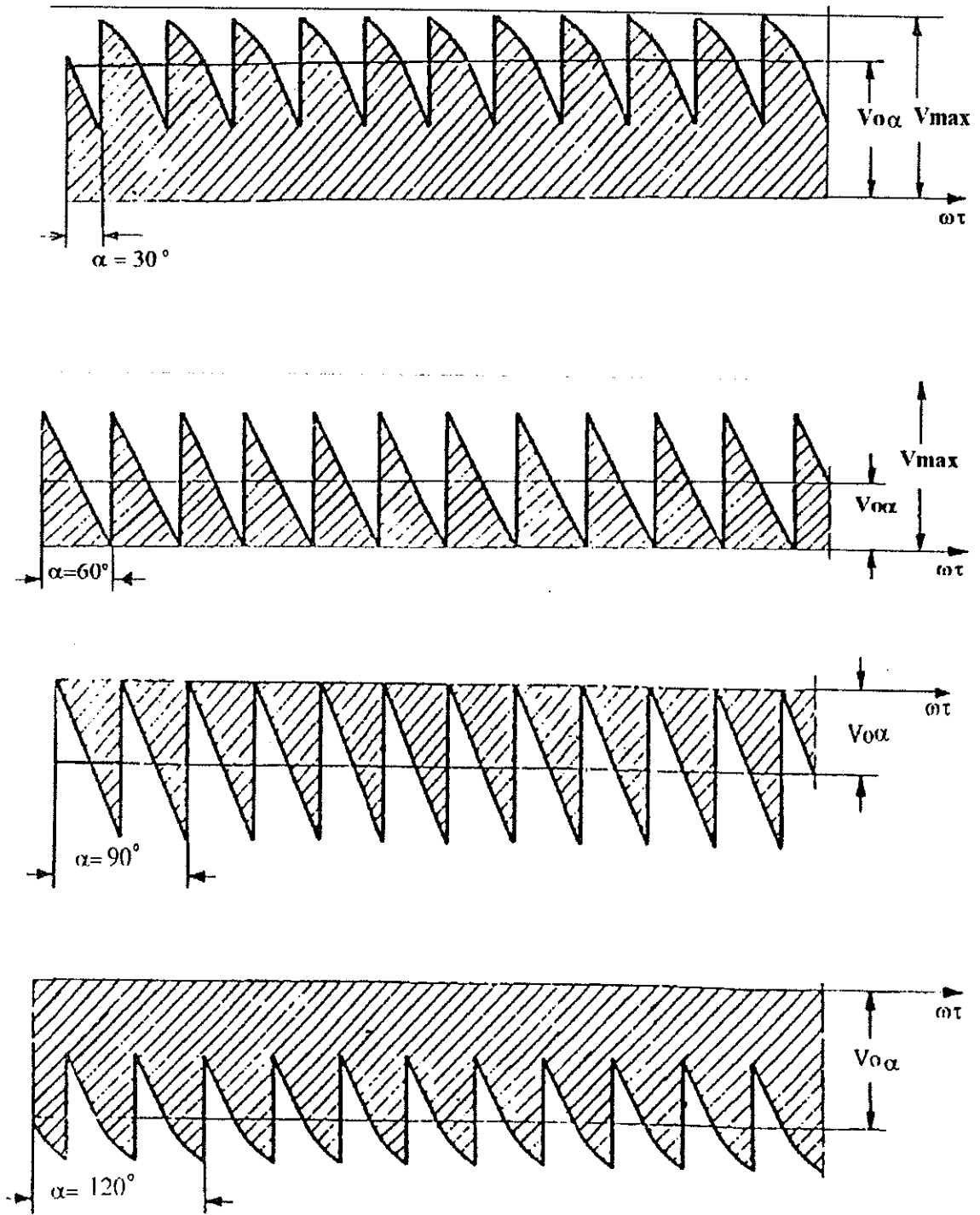
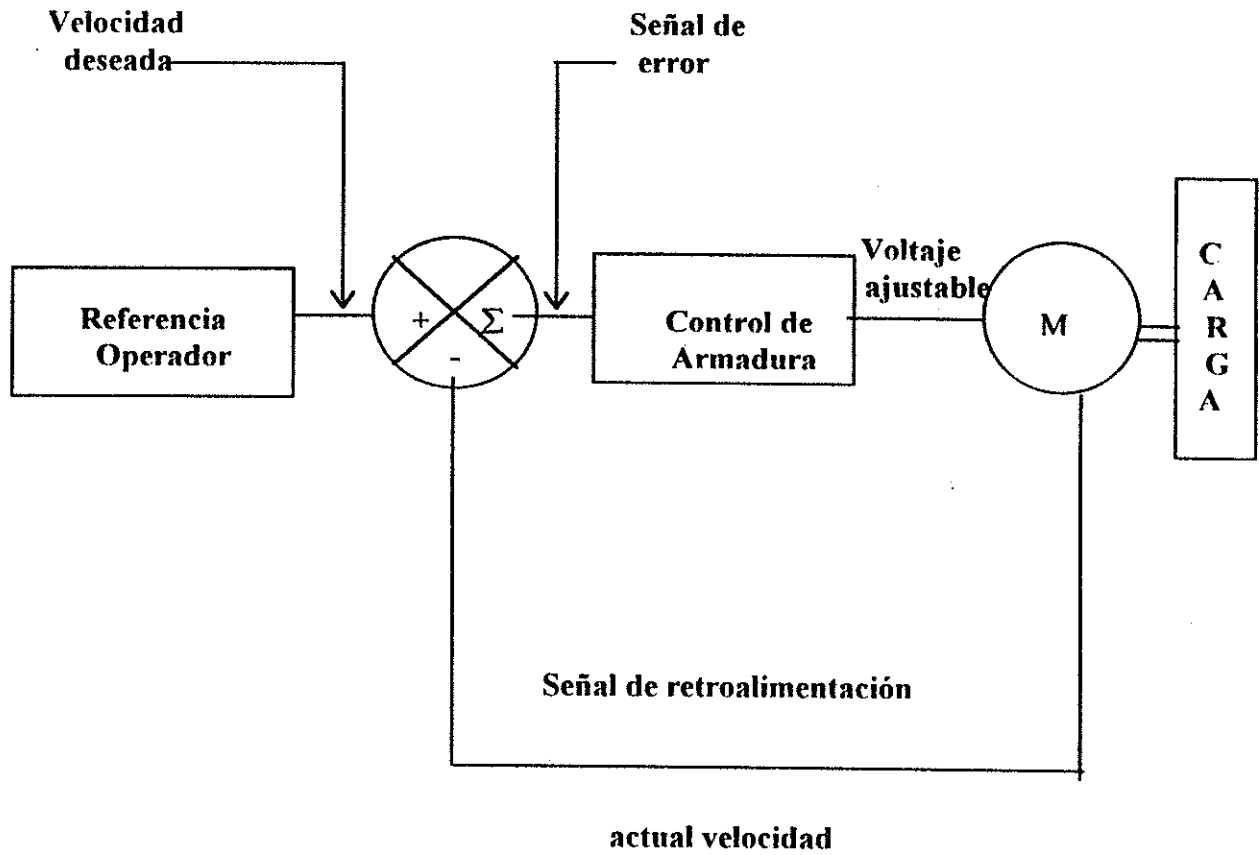


Figura 32, forma de onda en la salida de un controlador; para ángulos de  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ .

Adicionalmente un control de potencia de tiristores puede trabajar como inversor. **Inversor:** es el proceso de convertir la corriente directa en corriente alterna; para el control de motores de inducción se utiliza este proceso.



**Figura 33,** Representación en bloques de un sistema regulador de velocidad completo

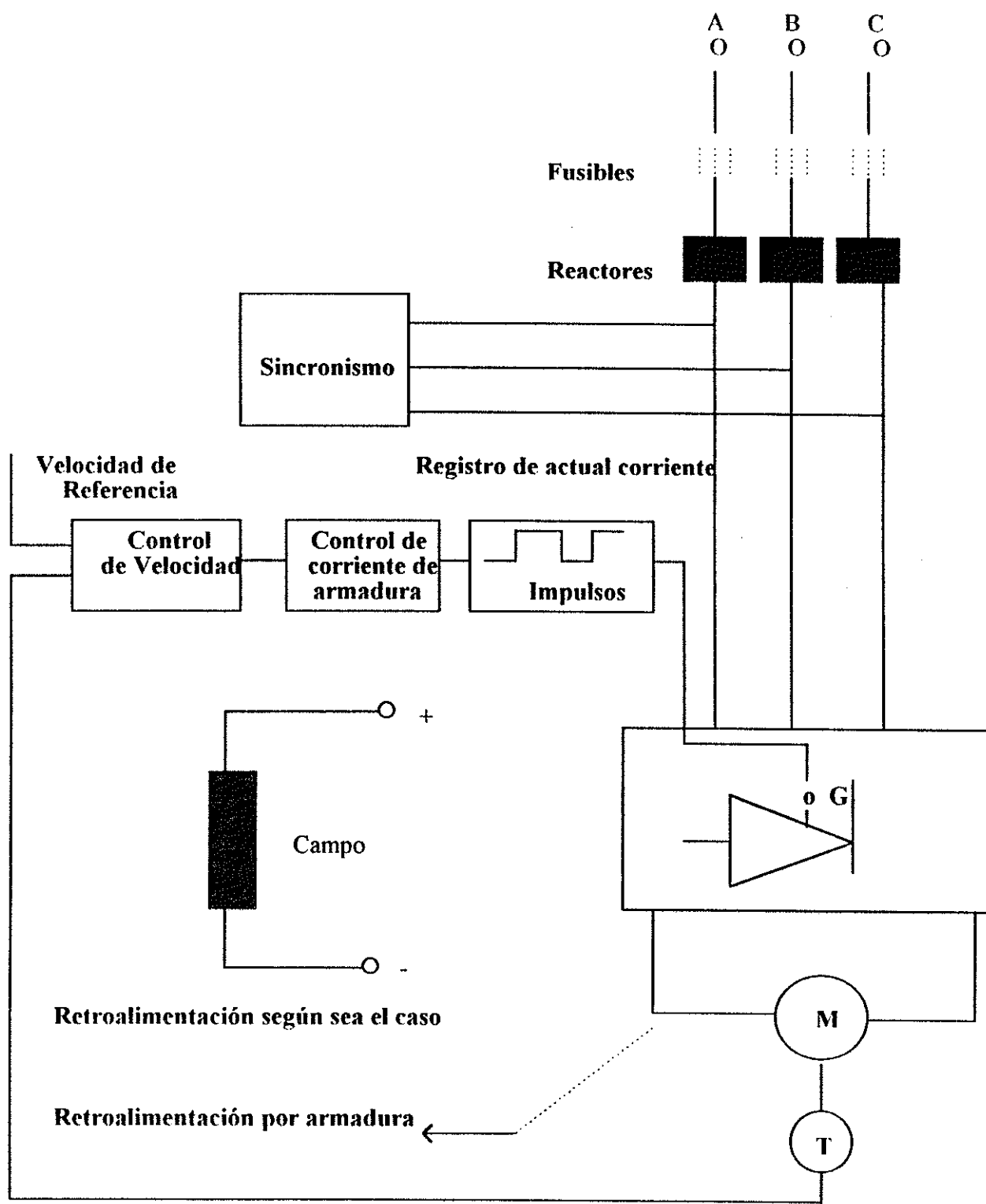


Figura 34, Diagrama en bloques de un variador de velocidad.

### 3.4 Mando de un variador de velocidad.

Separando el circuito de control de un variador de velocidad, se tiene el siguiente diagrama de bloques, figura 35:

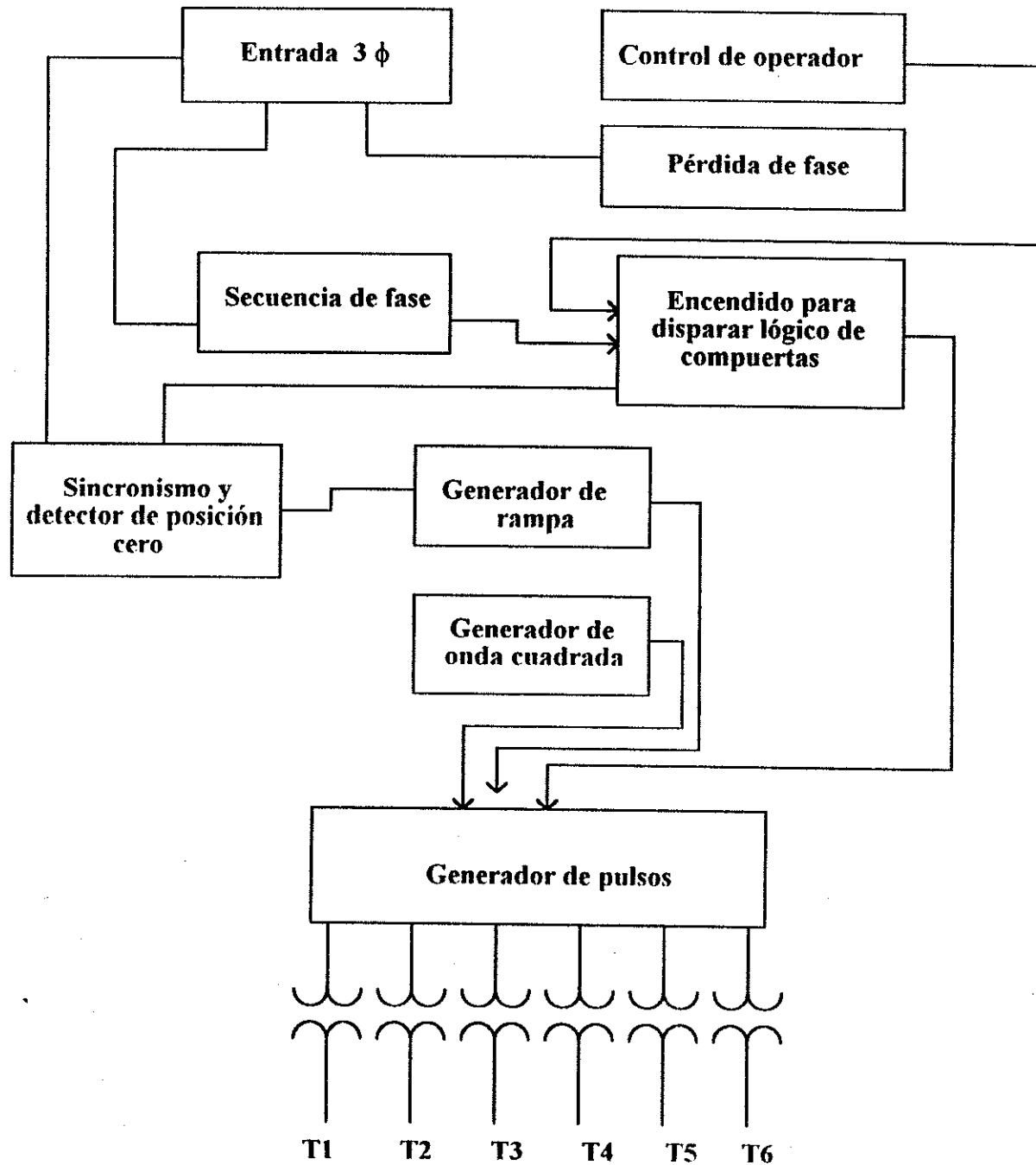
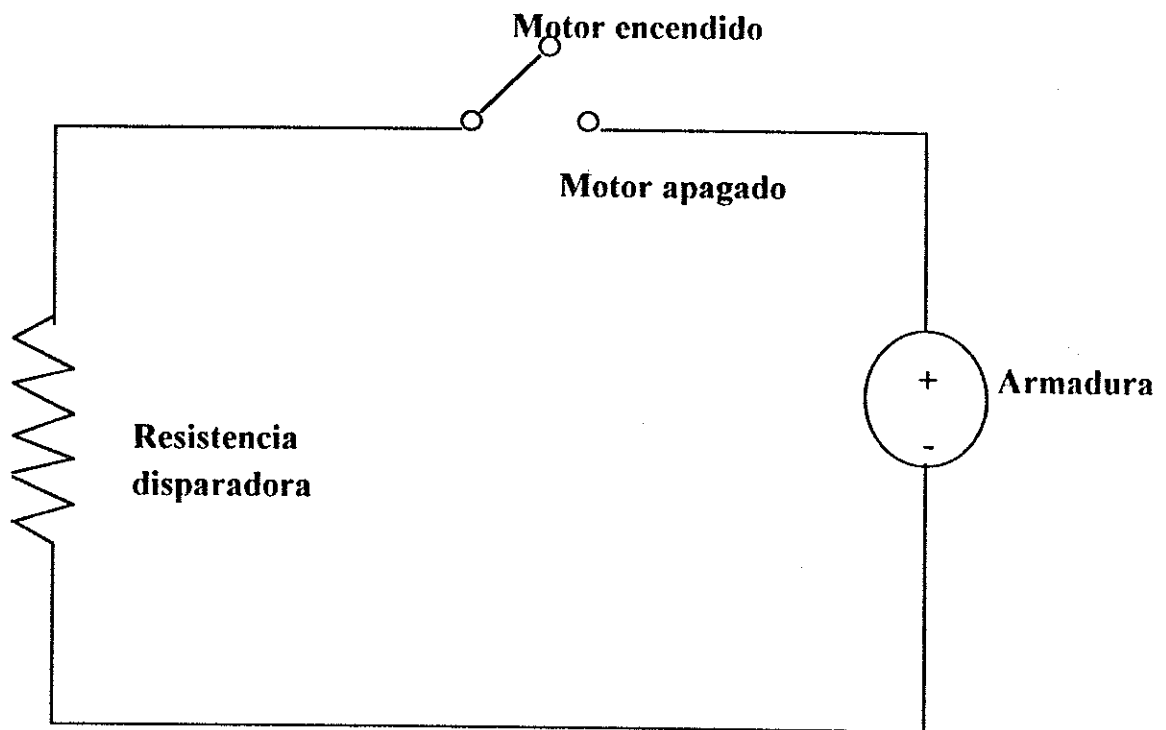


Figura 35, Diagrama en bloques del control de mando, en un variador de velocidad.



por medio de freno electromecánico o propiamente mecánico pero estos últimos frenados son costosos y disminuyen la vida útil de los motores. El **Frenado dinámico** es una de las técnicas más utilizadas en las cuales el motor es utilizado como un generador después de ser desconectado, como una fuente de poder eléctrica; cuando está trabajando como motor, éste desarrolla una fuerza contraelectromotriz. Cuando opera como generador, éste produce un torque en sentido contrario.

En general, se puede obtener un frenado dinámico disipando la energía generada por el motor por una resistencia capaz de disipar esta energía (Ver figura 36); en el momento que se apaga el motor queda conectado en paralelo con la armadura y sufre inmediatamente una desaceleración hasta quedar inmediatamente parado.



**Figura 36, Frenado dinámico con resistencia.**

### 3.7. Frenado dinámico automático, electrónico.

En la figura 37, se presenta un frenado electrónico automático.

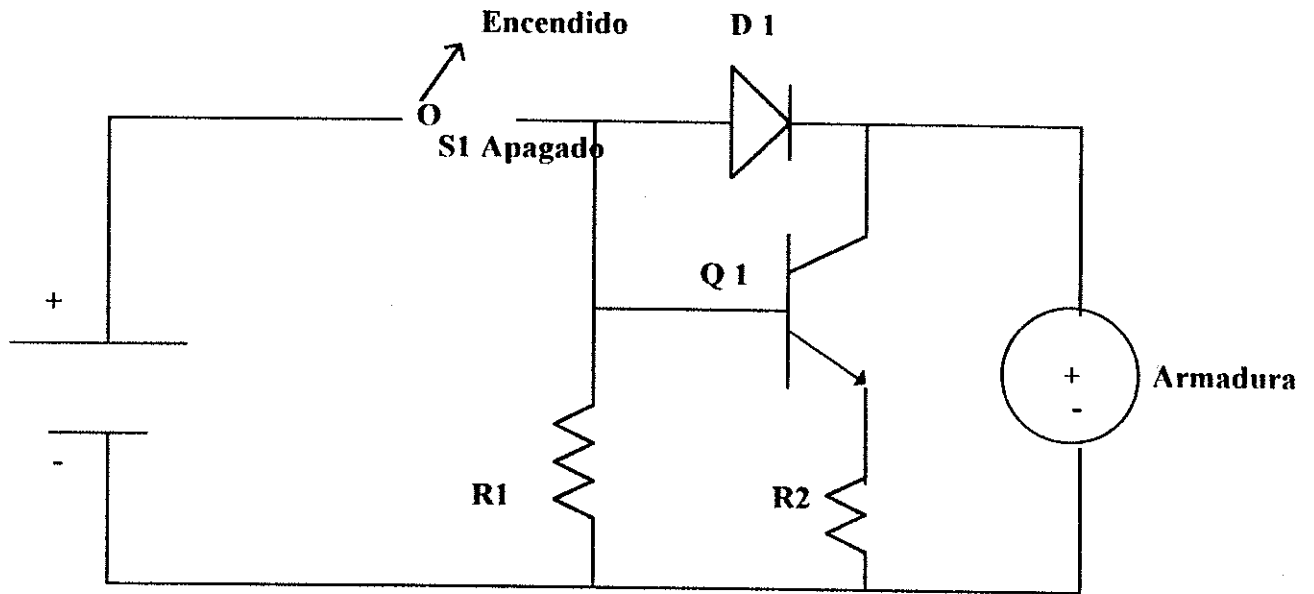


Figura 37, Frenado dinámico automático, electrónico.

Cuando el motor esté en la posición de encendido, la fuente alimentará la armadura del motor a través del diodo D1; el transistor Q1 está deshabilitado debido a que la parte emisor base está polarizado en inversa. Cuando el interruptor está en la posición de apagado, la armadura genera un voltaje igual polaridad al de la fuente de poder. En este momento, la base queda polarizada en directa a través de R1, y el transistor Q1 queda trabajando en el área de saturación, entonces su comportamiento será como un interruptor, que conecta R2 en paralelo con la armadura, con lo que se logra un frenado rápido, mientras la energía se disipa a través R2. Si es un motor paralelo,

el campo debe permanecer energizado durante el período de frenado, de otra manera sólo ocurriría un insignificante tiempo en el frenado del motor. Este circuito también funcionaría en un motor serie, si el campo es energizado de una manera apropiada después que la armadura es desconectada de la línea.

**CAPITULO 4**  
**CRITERIOS DE LA SELECCIÓN DE UN MOTOR DE CORRIENTE**  
**DIRECTA**

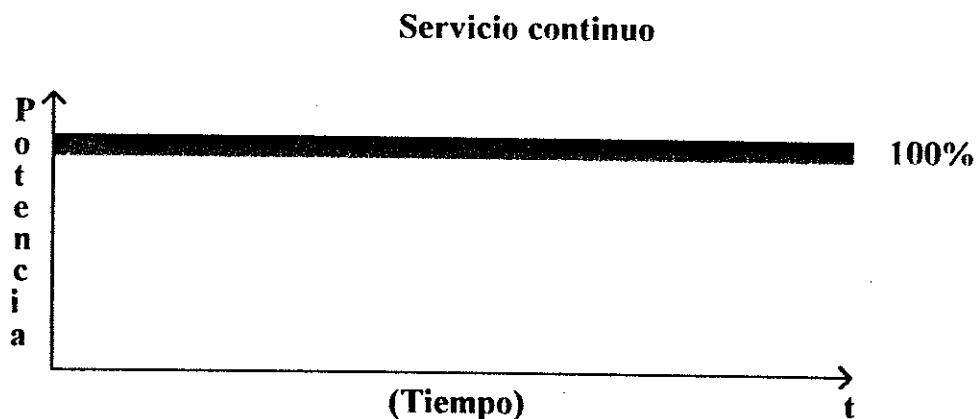
En la actualidad, existe un gran número de procesos industriales los cuales necesitan fuerza motriz, en los cuales los motores eléctricos son usados en gran magnitud, por lo que es necesario tomar en cuenta varios aspectos, para seleccionar el motor adecuado conforme al proceso que se requiera.

**4.1 Considerando el tipo de servicio a que estará sometido el motor.**

Tomando en cuenta las variaciones de la carga durante la operación del motor, por lo general los fabricantes de motores dan un factor de servicio de que tanto puede ser sobrecargado el motor, sin que éste se vea afectado considerablemente. Los motores son probados bajo carga, y las especificaciones las logran cuando los motores no llegan a temperaturas que excedan los estándares ya establecidos.

**4.2 Servicio continuo.**

En este tipo de servicio, el motor es sometido por tiempos continuos a la potencia nominal del mismo. Figura 38.

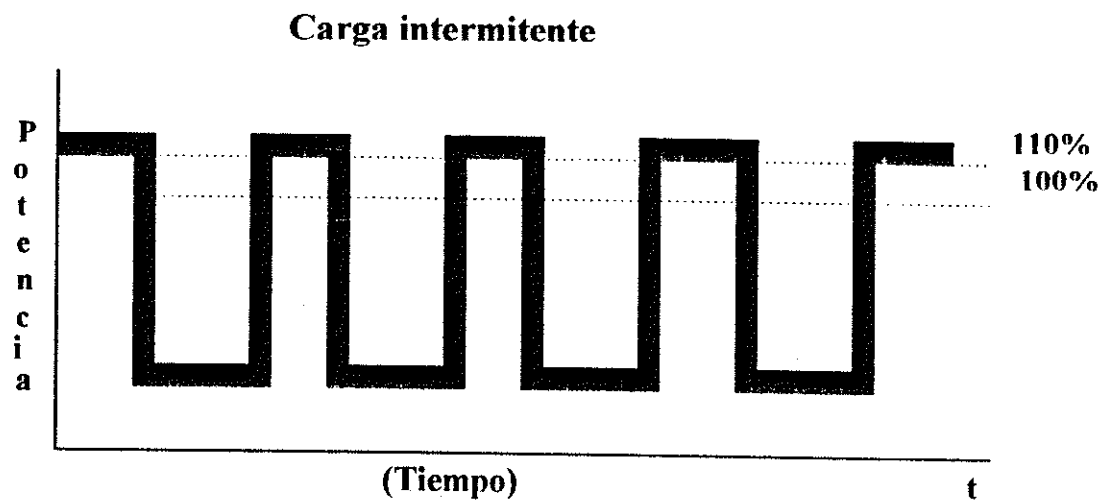


**Figura 38, Servicio continuo**

Ejemplos de cargas continuas: en procesos de extrusión, bandas transportadoras.

#### 4.3. Servicio continuo con carga intermitente o carga pulsante.

El motor es conectado por un período largo de tiempo, pero el motor es sometido a la carga sólo en breves períodos que ocurren más o menos regularmente. Bajo estas condiciones, se puede obtener del motor una potencia mayor que su potencia nominal. (Ver figura 39)



**Figura 39, Carga intermitente**

Ejemplos de servicio continuo con cargas intermitentes: en procesos de laminación de hierro, la carga es intermitente, ya que él trabaja con carga únicamente cuando pasa el hierro.

#### 4.4 Servicio continuo con carga intermitente o carga pulsante de corta duración.

En este tipo de servicio a diferencia del descrito anteriormente, se pone en marcha en un período tal que el motor se enfría hasta su temperatura mínima y luego es sometido a su carga de servicio durante un período corto de tiempo; en este caso el motor puede trabajar con más sobrecarga que la nominal. (Ver figura 40)

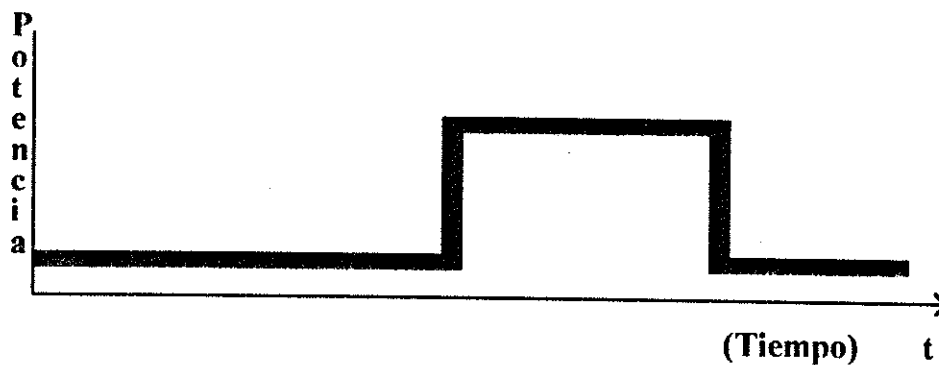


Figura 33, Servicio continuo con carga intermitente con pulsos de corta duración.

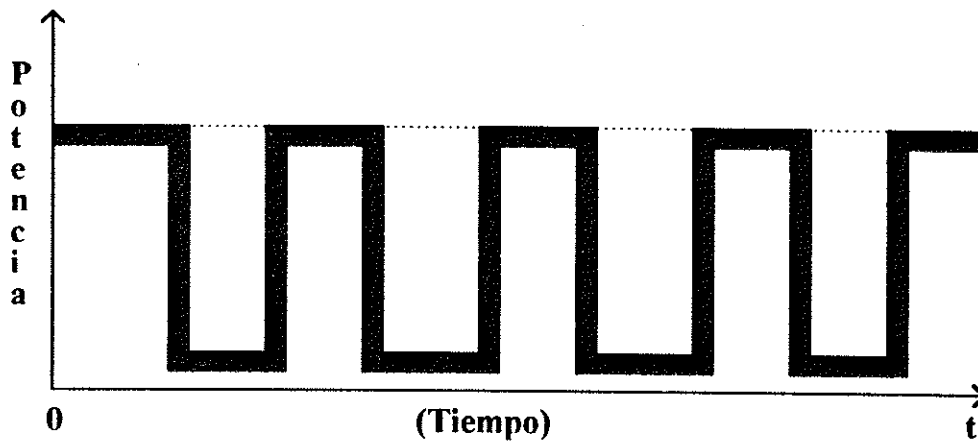
Ejemplo de servicio continuo con cargas intermitentes de corta duración en procesos de corte, donde un motor está acoplado a un embrague y es activado únicamente en el momento del corte .

Además de los tres tipos de servicio descritos anteriormente, existen otros tipos que se dan en la práctica.

#### 4.5. servicio con carga intermitente o carga pulsante con tiempos de apagado y encendido del motor.

El motor es conectado por períodos de tiempo, pero el motor es sometido a la carga sólo en los períodos en que el motor es encendido, lo que disminuye el tiempo

de enfriamiento y se aumenta el calor en el motor por los arranques que se presentan cada vez que se necesite manejar la carga (Ver Figura 34).

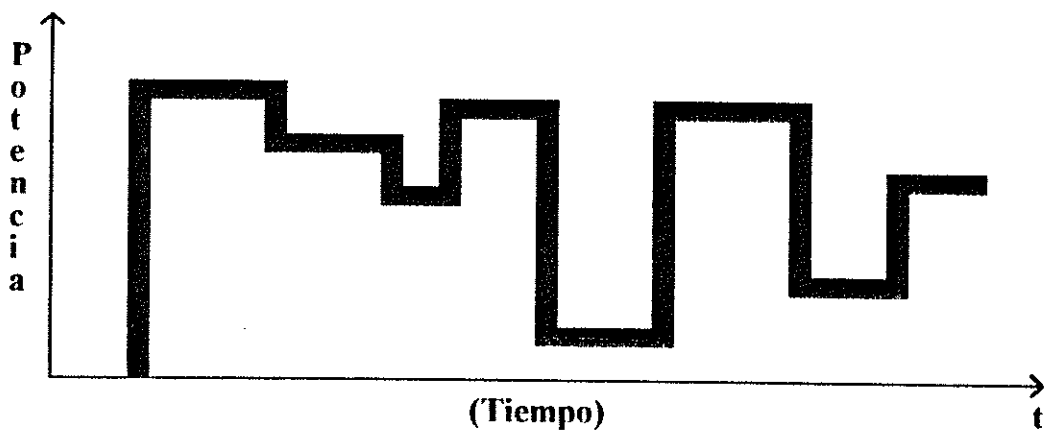


**Figura 34, Carga intermitente con tiempos de encendido y apagado.**

Un ejemplo de este tipo de servicio son los motores de accionamiento de ascensores.

#### **4.6. Servicio continuo con carga variable.**

En este servicio, el motor trabaja por un período largo de tiempo; pero su carga puede variar no uniformemente en diferentes magnitudes a través del tiempo. (Ver figura 35)



**Figura 35, Servicio con carga variable**

Ejemplo de este servicio motores dosificadores en los cuales su carga varia conforme van alimentando al sistema.

#### 4.7. Servicio con carga variable intermitente o pulsante con tiempos de apagado y encendido del motor.

El motor es conectado por períodos de tiempo, pero el motor es sometido a la carga sólo en los períodos en que el motor es encendido; pero la carga es variable en los tiempos de encendido, lo que disminuye el tiempo de enfriamiento y se aumenta el calor en el motor, por los arranques que se presentan cada vez que se necesite manejar la carga (ver figura 36).

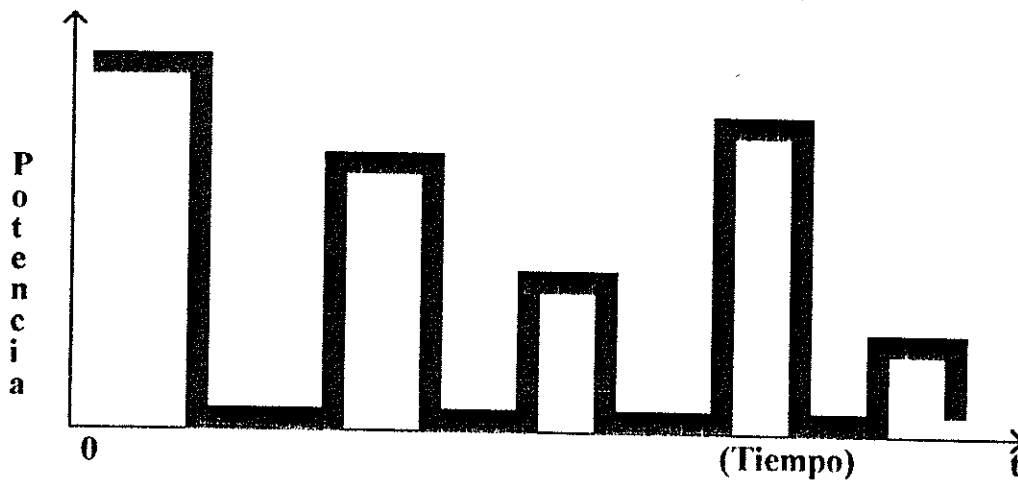


Figura 36, Carga intermitente con tiempos de encendido y apagado.

Ejemplo de este servicio son los motores de bandas transportadoras donde el motor es apagado y encendido durante el proceso de transporte, y su carga es variable.

#### 4.8. Eficiencia:

La eficiencia de un motor viene definida como la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada.



Dicho de otra forma, sería la relación entre la salida útil a la entrada. La potencia de entrada puede calcularse sumando la potencia de salida y la sumatoria de todas las pérdidas:

$$P_o = P_e - \sum P_{per} \quad (4.1)$$

$$E_{fi} = P_o/P_e \quad (4.2)$$

$E_{fi} = \frac{1 - P_{per}}{Pe} \quad (4.3)$
---

#### 4.9. Uso y comportamiento de los motores de corriente directa

**4.9.1. Motor serie:** este se caracteriza por tener un para arranque grande, y es prohibitivamente el arranque sin carga, que tiene como limitante la disminución de velocidad de acuerdo al aumento de carga; el par en la flecha del motor es directamente proporcional al cuadrado de la corriente de armadura. La capacidad de los motores de soportar fuertes sobrecargas y pares de arranques altos los hacen muy especiales en el uso de impulsores de elevadores, las grúas en sí, en cargas donde se necesite una fuerte tracción y en sistemas donde siempre los motores arranquen con carga.

**4.9.2. Motor derivación o paralelo:** este motor trabaja casi a velocidad constante, y su característica principal es que la velocidad disminuye poco al aumentar la carga. El par inducido es directamente proporcional a la corriente de armadura; su desventaja es que a cargas grandes el motor sufre calentamiento excesivos.

**4.9.3. Motor con excitación compuesto:** tiene un par de arranque más grande que un motor en derivación, pero menor que un motor serie. A cargas ligeras el motor, se comporta como un motor en derivación; el campo auxiliar tiene un efecto

despreciable sobre el campo. Cuando la carga llega a tener valores considerables, el efecto del campo auxiliar llega a ser verdaderamente importante, el motor se comporta como un motor serie. El motor compuesto acumulativo tiene las mejores características de los motores derivación y serie. Tiene un par de arranque más grande que un motor en derivación, pero menor que un motor serie. A cargas ligeras el motor, se comporta como un motor en derivación; el campo auxiliar tiene un efecto despreciable sobre el campo.

**4.9.4. Motor con excitación separada:** este motor tiene un comportamiento igual al motor en derivación; la diferencia es que este motor puede ser alimentado por dos fuentes independientes de corriente directa. Este motor ofrece una mayor flexibilidad para el control de velocidad, ya sea control por campo o armadura; para el control por armadura, se tiene par constante y una velocidad variable desde cero hasta la velocidad nominal de la máquina. En el control por campo, se tiene potencia constante y una velocidad variable que parte de la velocidad nominal a una velocidad que es más o menos el doble de la velocidad nominal; se pone este límite ya que se debe proteger el motor para las altas velocidades.

En la actualidad, el control electrónico de motores utiliza en su mayoría motores de excitación independiente, ya que por medio de los variadores de velocidad se pueden crear las distintas condiciones, par de arranque, velocidad, aceleración, etc.

#### **4.10. Otros aspectos que se deben de tomar en cuenta al seleccionar un motor CD.**

Además del tipo de servicio y tipo de motor CD que se debe seleccionar, se deben de tomar en consideración varios aspectos del medio ambiente donde opera el motor, temperatura, humedad, polvo y calentamiento del motor a bajas velocidades.

#### **4.10.1. Humedad y temperatura del medio ambiente.**

La temperatura del medio ambiente contribuye, ya sea a el calentamiento del motor o viceversa; si el clima es demasiado caliente, se debe tener cuidado con el o los tipos de lubricantes que se deben de utilizar, ya que la viscosidad de los mismos disminuye con la temperatura. Si el clima es demasiado frío o demasiado húmedo, por lo general se necesita de un motor con espacio para resistencias de calentamiento interno del motor para evitar que la humedad se forme dentro del mismo, y éstas trabajen únicamente cuando el motor esté inactivo.

#### **4.10.2. Ambiente saturado de polvo y agua.**

Por lo general en los ambientes donde hay demasiado polvo o existen salpicaduras de agua, es necesario instalar motores TEFC (Totally Enclosed Fan Cooled) motores totalmente sellados con ventilación forzada; la característica de este motor es que el ventilador va instalado directamente al eje del mismo, y el enfriamiento será proporcional a la velocidad que el motor opere.

#### **4.10.3. Motores que trabajan ha velocidades bajas por períodos de tiempos largos.**

Cuando un motor trabaja a velocidades bajas a un par constante, existe el problema que la corriente de armadura se incrementa considerablemente, y provoca en el motor un incremento de temperatura, que puede causar daños por calentamiento, para evitar esto se utilizan motores con ventilación constante, es decir un ventilador externo el cual inyecta aire al motor permanentemente a una velocidad determinada, no importando la velocidad a la que este operando el motor CD.

#### **4.10.4. Efectos de la altura sobre los motores CD.**

Generalmente los motores son diseñados para trabajar a una altura de 1000m sobre el nivel del mar, y a una temperatura ambiente de 40 grados centígrados; el efecto que produce a más altitud en estos motores es un decaimiento en la potencia del motor.

Las escobillas de carbón pueden causar serios problemas cuando trabajan a grandes altitudes; en este caso se debe seleccionar el tipo de escobilla adecuado.

## CAPITULO 5

### ANÁLISIS DE UN MOTOR CD EN ORDENADOR

#### 5.1 Manual y uso del programa.

Este programa analiza un motor de CD con excitación en derivación o separado, el cual nos muestra el comportamiento del motor durante el transitorio, es decir desde el momento que arranca el motor hasta el momento en el que llega a su estado estable.

#### 5.2 Parámetros necesarios para correr el programa:

- HP=** Potencia, ésta se obtiene de la placa de datos del motor que se va analizar.
- In=** Corriente nominal del motor. Se obtiene de la placa de datos del motor.
- RPM=** Revoluciones por minuto; se obtiene de placa de datos.
- Va=** Voltaje de armadura. Se obtiene de placa de datos.
- Vf=** Voltaje de campo. Se obtiene de placa de datos.
- Rf=** Resistencia de campo en ohmios. Se mide directamente del campo.
- Ra=** Resistencia de armadura en ohmios. Se mide directamente de la armadura.
- Rarr=** Resistencia de arranque; ésta se puede despreciar o asumir valores para analizar como varía el transitorio agregándole resistencia a la armadura.
- Ha=** Inductancia de armadura. Se puede medir directamente de la armadura.
- Hf=** Inductancia de campo. Se puede medir directamente del campo.
- B=** Constante de fricción del motor y carga en  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ .
- J=** Constante de inercia del motor y carga en  $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$ .

#### 5.3 Corrida Del Programa.

El programa se corre desde el DOS y aparecerá lo siguiente:

c:\\_

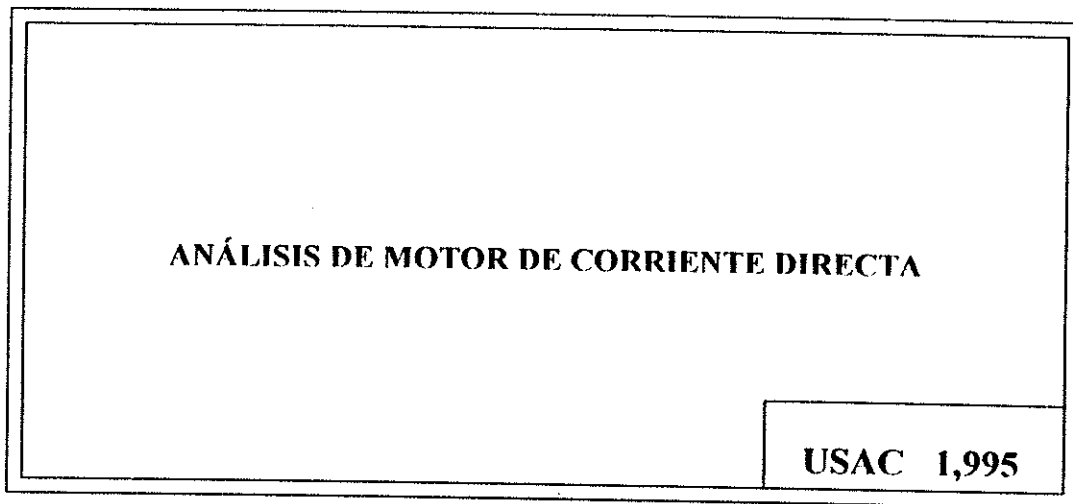
c:\ A:

Escriba A: presione enter

**A:\ MOTOR**

**Escriba motor Presione Enter.**

**5.3.1 Pantalla de presentación:**



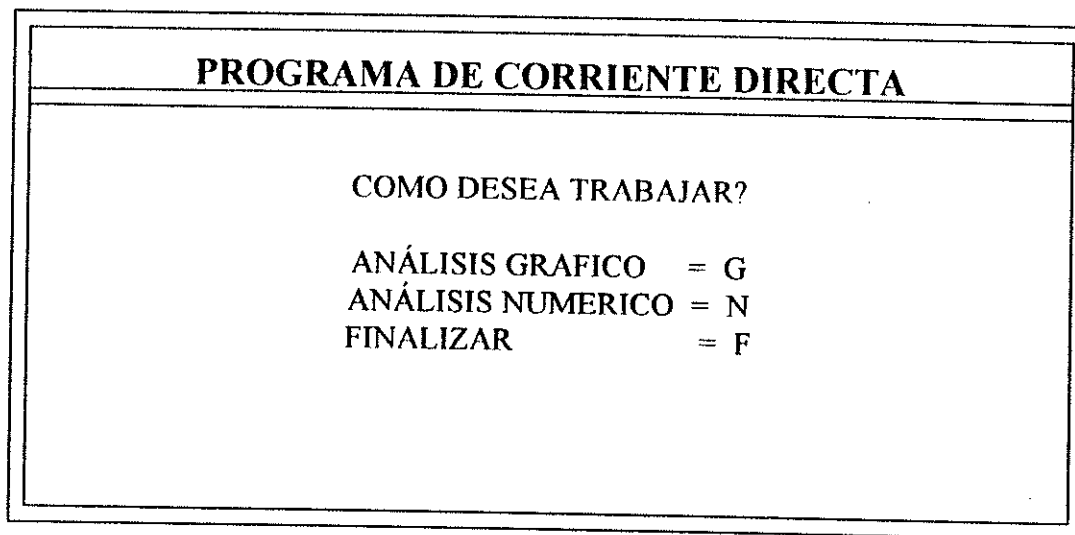
**ANÁLISIS DE MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA**

**USAC 1,995**

**Presione Enter.**

**5.3.2 Pantalla De Consulta.**

**Pregunta el tipo de análisis que desea realizar:**



**PROGRAMA DE CORRIENTE DIRECTA**

**COMO DESEA TRABAJAR?**

**ANÁLISIS GRAFICO = G**  
**ANÁLISIS NUMERICO = N**  
**FINALIZAR = F**

**Presione Enter.**

### 5.3.3 Modo gráfico

Si es G aparecerá la siguiente pantalla

**Pantalla Ejemplo:**

PROGRAMA DE CORRIENTE DIRECTA	
INGRESE LOS VALORES NOMINALES DEL MOTOR DC	
TRABAJA UN EJEMPLO	
SI	= S
NO	= N

### 5.3.4 Pantalla Ingreso De Datos

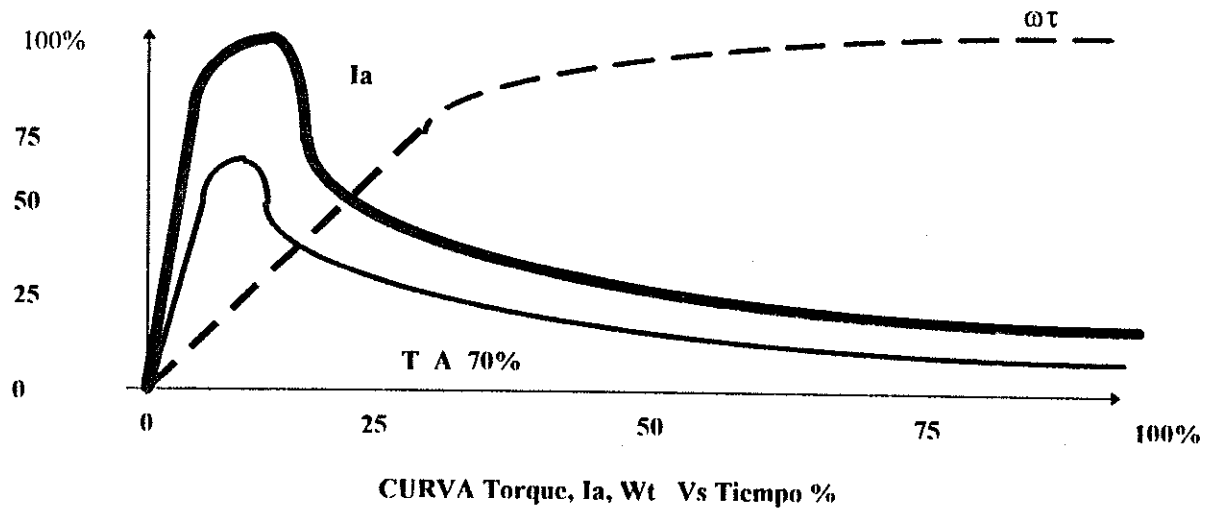
Si ingreso N, ingrese los valores nominales del motor.

PROGRAMA DE CORRIENTE	
TIPO MOTOR	
DERIVACION = D	
SEPARACION = S	S
POTENCIA DEL MOTOR EN HP =	8
CORRIENTE NOMINAL $I_n = ?$ AMPS.	25
RMP DEL MOTOR N =	1600
VOLTAJE DE ARMADURA $V_a =$	500
VOLTAJE DE CAMPO $V_f =$	300
RESISTENCIA DE CAMPO	200
RESISTENCIA DE ARMADURA $R_a = ? \Omega$	0.8
RESISTENCIA DE ARRANQUE $R_{arr} = ? \Omega$	0
INDUCTANCIA DE ARMADURA $L_a = ?$ HENRIOS	0.015
INDUCTANCIA DE CAMPO $L_f = ?$ HENRIOS	120
C.TE. FRICCION MOTOR Y CARGA $B = ?$ KG-m <sup>2</sup>	0.5
C.TE. INERCIA MOTOR Y CARGA $J = ?$ N-Seg/m	2.1

5.3.5. Pantalla De Espera: se están calculando máximos del transitorio.

### 5.3.6. Pantalla gráfica:

La siguiente pantalla nos muestra el transitorio de forma gráfica y mantiene la pantalla fija en el final del transitorio; las curvas que nos muestra son las siguientes:



Presione **Enter** para finalizar, y regresa a la pantalla de consulta.

### 5.3.7 Pantalla datos ejemplo:

Si su selección fue S, presenta pantalla con datos de motor, por ejemplo:

PROGRAMA DE CORRIENTE DIRECTA	
DATOS DEL MOTOR	
hp:	= 5
n:	= 1273
Va:	= 240
Vf:	= 240
Ra:	= 0.6
Rf:	= 240
Lf:	= 12012
B:	= 0.35
J:	= 1.20
In:	= 16
Rarr:	= 0



Presione **Enter**.

**Pantalla de espera .**

**Pantalla gráfica**

Presione **Enter**.

Luego regresa a la **Pantalla inicial**.

#### **5.4 Modo numérico.**

Si eligió **N** de pantalla de consulta presentará:

##### **5.4.1 Pantalla ejemplo**

Si eligió **N**, presentará :

##### **5.4.2 Pantalla ingreso datos**

##### **5.4.3 Pantalla ecuación característica**

$$\begin{aligned} I_a &:= A \quad + - \quad A1 * \text{EXP}(t * X1) \quad + - \quad A2 * \text{EXP}(t * X2). \\ Wt &:= C \quad + - \quad C1 * \text{EXP}(t * X1) \quad + - \quad C2 * \text{EXP}(t * X2). \end{aligned}$$

Presione **Enter**.

#### 5.4.4 Pantalla variación

TRANSITORIO	
IA = 329.83	A
N = 135.60	rpm
T = 593	N-m

Presione Enter.

Regresa a pantalla de consulta

#### 5.5 Modo finalizar

Si eligió F esto finaliza su sesión con el programa.

#### 5.6. Ejemplo de un motor real:

Análisis de un motor U.S. Electrical de corriente directa de excitación por separado con los siguientes valores:

**Resultados:**

	A	V	V	ohmio	ohmio	ohmio	henrios	N-s	kg-m <sup>2</sup>	rpm	A
hp	In	Va	Vf	Ra	Rarr	Rf	La	B	J	Nmax	Imax
100	170	500	300	0.079	0.0	98	.00027	1.2	30	2515	5641
100	170	500	300	0.079	0.0	98	.00027	1.2	15	2514	5293
100	170	500	300	0.079	0.0	98	.00027	1.2	10	2512	5040
100	170	500	300	0.079	0.0	98	.00027	1.2	8	2515	4881
100	170	500	300	0.079	0.04	98	.00027	1.2	30	2515	5641
100	170	500	300	0.079	0.08	98	.00027	1.2	30	2515	5641
100	170	500	300	0.079	0.1	98	.00027	1.2	30	2515	5641
100	170	500	300	0.079	0	98	.00027	1.2	20	2499	5444
100	170	400	300	0.079	0	98	.00027	1.2	20	2424	3526
100	170	200	300	0.079	0	98	.00027	1.2	20	2250	2433

De los anteriores resultados del programa, se puede determinar lo siguiente:

- a. Que al variar la resistencia de armadura por medio de  $R_{arr}$  la corriente máxima de armadura disminuye cuando se aumenta  $R_{arr}$ .
- b. Al disminuir el voltaje de armadura la velocidad final y corriente en el transitorio disminuyen. Esto quiere decir que la velocidad es directamente proporcional al voltaje aplicado.
- c. Al disminuir la carga del motor, la corriente máxima disminuye o viceversa; la corriente es directamente proporcional a la carga que se este moviendo.
- d. Los parámetros que se pueden variar en el programa son:  $V_a$ ,  $V_f$ ,  $R_{arr}$  y la carga del motor  $J$  y  $B$  en el programa, aunque generalmente el voltaje de campo no se varía en la mayoría de los motores por separado.

## CONCLUSIONES

- 1.- El motor serie se caracteriza por tener un par de arranque grande. Son usados en elevadores, starters de carros o cualquier proceso donde la carga esté presente, y nunca deben ser arrancados sin carga. El par es directamente proporcional a la corriente de armadura.
- 2.- El motor derivación o paralelo trabaja casi a velocidad constante; su característica principal es que la velocidad disminuye menos al aumentar la carga. El par es directamente proporcional a la corriente de armadura.
- 3.- El motor con excitación compuesta tiene un par de arranque menor que un derivación, pero menor que un serie. A cargas ligeras, se comporta como un derivación y a cargas grandes se comporta como serie. Éste tiene las mejores características del motor serie y derivación.
- 4.- El motor con excitación por separado tiene un comportamiento igual al de derivación; la diferencia consiste en el tipo de conexión. En la actualidad, es el más utilizado en la industria en procesos de velocidad variable, ya que los controles variadores de velocidad crean las condiciones de carga de acuerdo con las condiciones de trabajo, y la mayoría son fabricados para este tipo de conexión.
- 5.- Control de velocidad por armadura. Con el método de control de velocidad por armadura, el voltaje de armadura es variado desde un valor cero hasta el valor nominal. La velocidad es variada desde cero hasta el valor nominal. Es el más utilizado en la actualidad en procesos de control, donde la velocidad es un factor importante.

- 6.- Control de velocidad por campo. Con el método de control de velocidad por campo, el voltaje de campo es variado de su valor nominal a un valor más bajo, donde la velocidad es gobernada desde su valor máximo hasta un valor de aproximadamente el doble de la velocidad nominal.
- 7.- El programa analiza un motor de corriente directa, donde es presentado el transitorio de arranque. Las limitantes principales del transitorio son la carga, voltaje de armadura  $V_a$ , resistencia de armadura  $R_a$ .
- 8.- En la actualidad, existen los motores de corriente directa sin escobillas, los cuales son incluidos en el apéndice 1, al final de los capítulos; estos motores son los más eficientes que existen en la actualidad, y ya se están utilizando en varios procesos industriales.
- 9.- El análisis de un motor por ordenador facilita en gran medida el trabajo de cálculos numéricos. Adicionalmente, nos da una presentación gráfica del comportamiento de los parámetros variables que interactúan en el transitorio del motor.
- 10.- El motor de corriente directa sin escobillas no se puede analizar por medio del programa propuesto en esta tesis.

## RECOMENDACIONES

- 1.- Al seleccionar un motor CD, además del tipo de servicio y conexión, se debe considerar el medio ambiente, temperatura, humedad, polvo y revoluciones de operación.
- 2.- Al utilizar el programa, se debe tomar en cuenta que los análisis son para motores característicos, y por lo tanto los valores que se le ingresen deben ser valores reales.
- 3.- Para obtener buenos resultados, se recomienda variar un parámetro durante las corridas que se le hagan con el fin de observar como varía el transitorio; por ejemplo, variar  $R_{arr}$  durante las corridas que se hagan, y los demás parámetros mantenerlos constantes.
- 4.- Si se desea observar el efecto del voltaje de armadura sobre la velocidad final del transitorio, se deben de correr las veces que desee el usuario, y así observará cómo disminuye la velocidad final al ir disminuyendo el voltaje.
- 5.- Se sugiere variar los siguientes parámetros:  $R_{arr}$ ,  $V_a$ ,  $V_f$  a la hora de analizar un motor por medio del programa, ya que éstos son los que definen el comportamiento del motor en cualquier proceso donde se utilice un motor de corriente directa.
- 6.- Para obtener los valores reales de  $I_a$ ,  $W_t$ , se debe multiplicar el valor máximo por el porcentaje de escala; para el torque, se debe de tomar en que el 70% es el 100% del valor máximo del torque, sólo para fines de graficación, ya que el torque es directamente proporcional a la corriente.
- 7.- Se recomienda el motor de corriente directa sin escobillas, para investigarlo y realizar un programa que se analice por medio de un ordenador.

## BIBLIOGRAFÍA

- CHAPMAN, Stephen J. **Maquinas eléctricas.** Bogotá Colombia. McGraw-Hill latinoamericana, 1,984.
- FITZGERALD, A. E. et. al. **Maquinas eléctricas.** Segunda edición. Barcelona España. Editorial Hispano Europea, 1,980.
- GWYTHER, H.F.G.. **Potencia eléctrica y electrónica de potencia.** México. Ediciones Alfaomega, S.A. de C.V. D.F. 1,993.
- KOSOW, I.L. **Maquinas eléctricas y transformadores.** España. Editorial Reverte S.A. 1,980.
- LEANDER, W. Matsh. **Maquinas electromecánicas y electromagnéticas.** México. Ediciones Alfaomega S.A. 1,990.
- MORROW, L.C. **Enciclopedia de mantenimiento industrial.** Tomo III. X edición. México. Editorial Continental S.A. 1,986.
- NASAR, Syed A. **Maquinas eléctricas y electromecánicas.** México. Serie Schaun McGraw-Hill de México S.A. de C.V. 1,985.
- TENENBAUN, Aaron M. **Estructura de datos en pascal.** México. Prentice Hall Hispanoamericana. 1,983.
- VALKENBURG, Van. **Análisis de redes.** México. Editorial Limusa, S.A. de C.V. 1,986.
- VEMBU, Gourishankar. **Conversión de energía electromagnética.** México. Ediciones Alfaomega, S.A. C.V. México D.F. 1,990.
- WELSH, Jim. **Pascal introducción.** México. Prentice-Hall hispanoamericana, S.A. 1,983.
- Catálogo B-10-3000.** Mexico. Asea Brown Boveri. Motores S.A. División motores y motoredutores Tlalnepantla, Edo. de México. s.f.
- Drives catalogo.** E.E.U.U. Baldor motor drive.. Matchet performance motor & and controls. 1,992.

**Borland turbo Pascal 5.0.** E.E.U.U. California. Borland international Scotts Valley. 1,988.

**Drive y motores de CD sin escobillas.** Powertec. Rock Hill, E.E.U.U. 1,992.

**Manual Flex Pak plus vs drive.** E.E.U.U. Reliance Electric 1,983.



## APÉNDICE 1

### INTRODUCCIÓN AL MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA SIN ESCOBILLAS

En la actualidad, la tecnología del motor de corriente directa se ha desarrollado de tal forma que ya existen los motores de corriente directa sin escobillas; en estos motores la regulación de velocidad no se mide en la relación al porcentaje de rpm como en el otro tipo de controles y motores AC y DC tradicionales, sino en la posición física del eje dentro de una revolución. En este apéndice se verá en forma simplificada el funcionamiento de un motor de corriente directa sin escobillas

#### Construcción de un motor de corriente directa sin escobillas

El estator viene provisto de embobinados de la misma forma que un motor AC y conexiones similares. (Ver figura 37)

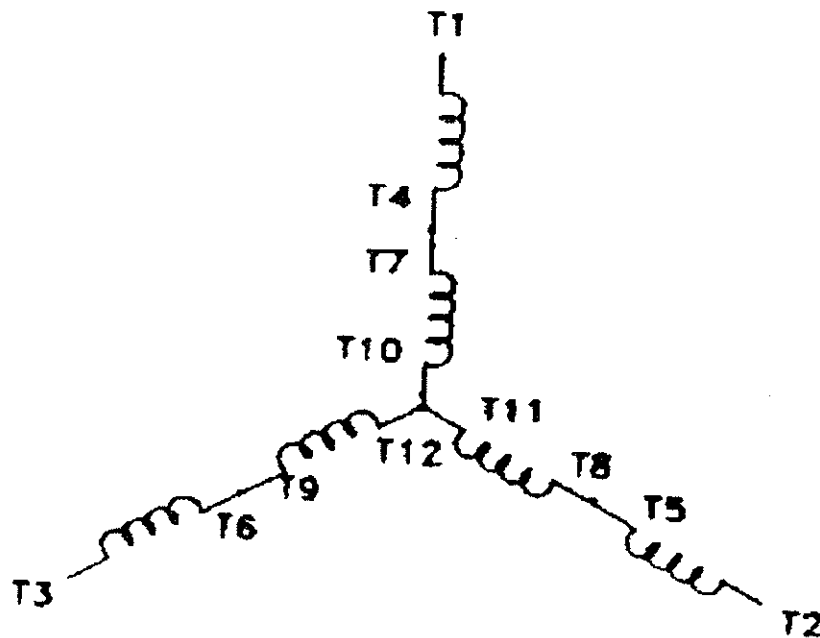


Figura 37, conexión Y para un motor CD sin escobillas.

La diferencia se encuentra en el rotor, el cual usa imanes permanentes en lugar de barras de rotor en corte. Adicionalmente el motor viene provisto de un sensor digital para el control de velocidad (rotopulsor o encoder), el cual está acoplado integralmente al rotor para indicarle al control la salida de voltaje para el control de velocidad. (Ver figura 38)

### Control de velocidad para un motor CD.

La energía AC trifásica es convertida a corriente directa por medio de un puente rectificador trifásico, que tiene una bobina de entrada en la terminal positivo del puente de diodos, que protege del ruido en la línea y limita el ritmo al que la corriente aumenta o disminuye luego un banco de capacitores llamados Buss, cuya función es almacenar y proveer energía CD a los transistores en el puente salida, según el motor la requiera. (Ver figura 38)

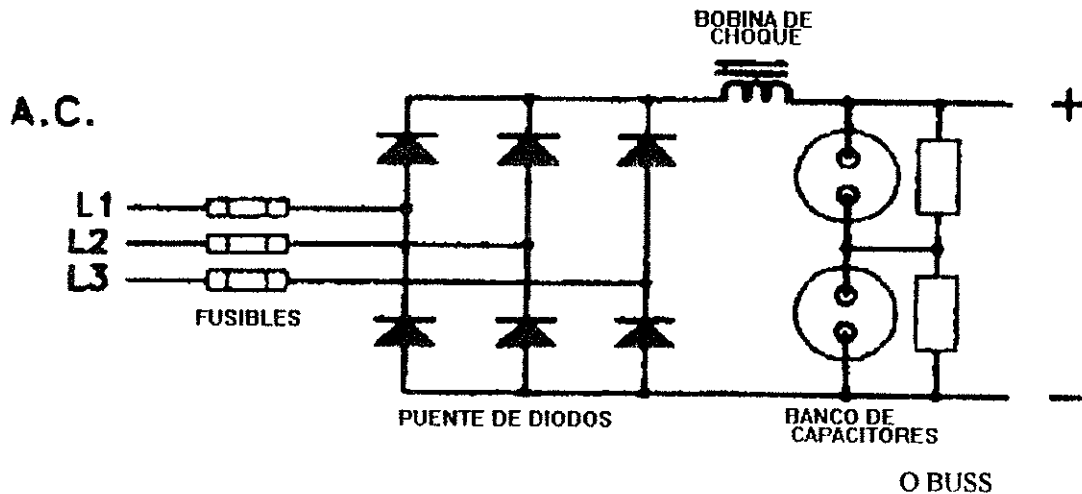


Figura 38, Dibujo simplificado de la sección de voltaje de entrada de un control de CD, para un motor sin escobillas.

El nivel de voltaje máximo posible en los capacitores es 1.4 veces mayor al voltaje de línea a línea (voltaje pico); inicialmente antes que el motor arranque, los capacitores se cargan a su voltaje pico. Cuando se arranca el motor, se usa la energía de los

capacitores para cumplir el trabajo requerido. El efecto de esto es una descarga parcial de los capacitores, y disminuye el voltaje del "buss", con voltaje de entrada trifásico; hay seis periodos en cada ciclo de AC cuando el voltaje de línea a línea es mayor que el voltaje de los capacitores. Los capacitores obtienen voltaje de la línea únicamente cuando el voltaje de los capacitores está por debajo del voltaje instantáneo de línea a línea, y aún usa solamente suficiente fuerza para reemplazar la energía que haya consumido el motor desde la última vez que el voltaje de línea a línea haya sido mayor que el voltaje de los capacitores.

El torque es función de corriente; la potencia es función de velocidad y torque; aunque la corriente que necesite un motor para desarrollar torque sea grande, la potencia real utilizada por un motor a baja velocidad es pequeña, porque la energía que se extrajo de los capacitores es la potencia real utilizada por el motor. La energía tomada de las líneas de fuerza es la energía real que el motor utilizó.

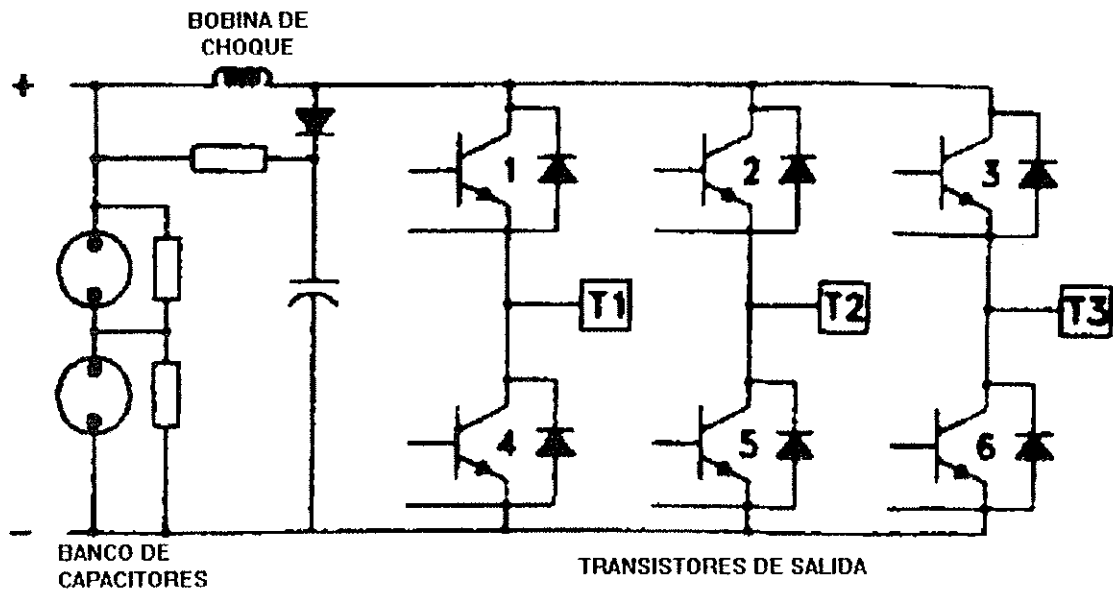
El control de velocidad de este tipo de motores tiene la característica de manejar el motor CD sin escobillas a velocidades muy bajas y mantener el torque máximo, y a la vez consume muy poca corriente de línea; el resultado de esto es: que la corriente RMS en la entrada del controlador CD, es directamente proporcional a la potencia de salida en vez de ser proporcional a la carga del motor.

#### **Regulación de velocidad:**

El rotopulsador o encoder está integralmente acoplado al rotor del motor, y es el encargado de comunicarle al motor cuál es la posición exacta donde se encuentra el eje del motor dentro de un ciclo; también este mismo le indica al control de velocidad que transistor debe disparar, es decir el rotopulsador monitorea el control de velocidad.

La salida del control de velocidad consiste en tres líneas de salida en las cuales existen tres transistores en el lado positivo y otros tres transistores en el lado negativo

del BUSS; cada vez que se activa un transistor, éste conecta una línea de salida al banco de capacitores; cada transistor tiene conectado un diodo a cada lado del BUSS, con el objeto de aprovechar la energía de retorno que el motor no utilice y sea aprovechada por el motor. (Ver figura 39)



**Figura 39.** El puente de voltaje de salida consiste de seis transistores de salida y componentes de atenuación.

Nuevamente el rotopulsor le dice al control cuál transistor debe ser disparado para entregar la potencia máxima del motor. Esto se hace por medio de un EPROM (circuito integrado de memoria eléctricamente programado para lectura solamente). La figura 41 muestra en forma simplificada la forma de control de disparo de los transistores; note que la flecha más larga en el interruptor gobierna el disparo de los transistores del lado positivo del BUSS numerados 1, 2, 3, y la flecha más corta gobierna los 4, 5, 6. El arreglo es de tal forma que cada uno de los transistores de arriba puede ser disparado conjuntamente con uno de los transistores de abajo, con las otras dos líneas de salida; sin embargo un transistor de arriba nunca puede ser disparado con uno de abajo conectados físicamente en la misma línea de salida con el fin de evitar un corto circuito en la salida del BUSS. Los circuitos guías también

están protegidos para evitar que se disparen dos transistores de una misma línea de salida. (Ver Figura 40)

El rotor de la figura 41 tiene un juego de imanes permanentes, un polo norte y un polo sur, los cuales van a interactuar con los campos producidos en el estator (armadura) en este caso.

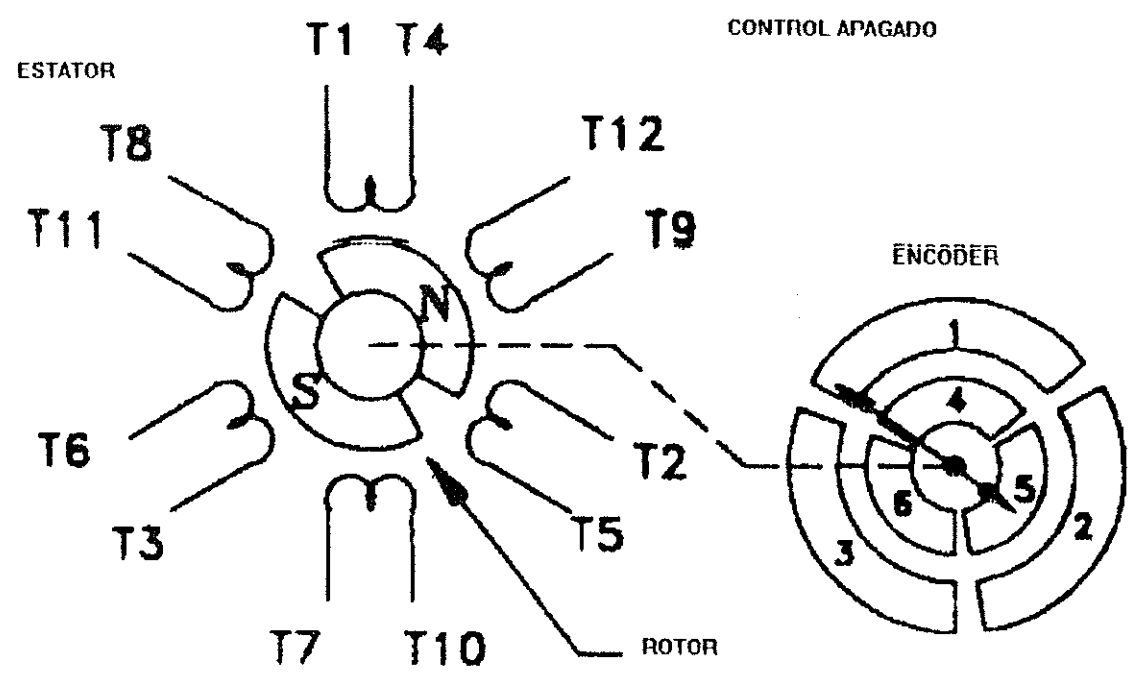


Figura 40, Dibujo simplificado de un motor CD, sin escobillas.

**5.4 Secuencia de disparo de los transistores.**

Para analizar la secuencia de disparo del control, se analizará la figura 41; cuando el control se enciende en la posición mostrada, los transistores 1 y 5 se encenderán, lo que permitirá el paso de corriente del lado positivo del Buss a través del transistor 1 hacia la terminal del controlador T1 entrando al embobinado del motor T1 y a través de T4, T7, T10 hasta la conexión en el centro del motor, ya que el transistor T5 esta disparado; la corriente pasa a través de T11, T8, T5, T2 (ver fig. 37) hacia T2 del control y a través del transistor 5, la dirección de la corriente es representada en la figura 41, que establece polos magnéticos en el estator, de la

manera siguiente: polos norte en T1-T4 y T11-T18 y polos sur en T7-T10 y T2-T5. Los polos norte en el estator atraen al polo sur del rotor y repelen el polo norte del rotor. La rotación va ocurrir en la dirección indicada produciendo el par en la salida del motor.

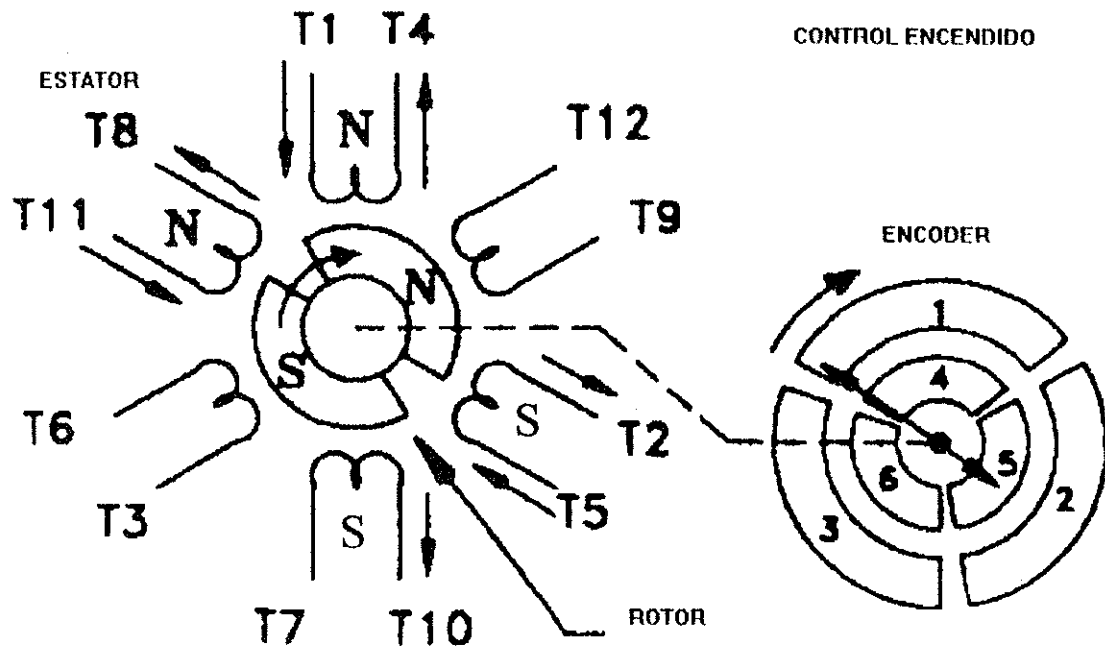


Figura 41. Flujo de corriente y formación de polos norte y sur en el estator,

En vista que la carga altamente inductiva, esta corriente crecería en forma casi lineal si los transistores estuvieran disparados continuamente; sin embargo, la interrupción de los transistores de abajo es la modulación del ancho del pulso CD y la frecuencia a la cual los transistores son disparados es relativamente alta; el ancho del pulso es determinado por el par que necesite el motor para girar, el cual está por debajo de velocidad y efectividad del control de posición.

La cantidad de torque que se requiere es determinado por la carga en el eje del motor, mientras más liviana es la carga más corto es el pulso CD o entre más grande es la carga más largo será el pulso CD, hasta que alcancen su ancho máximo; esto dependerá de la capacidad del motor y del control; con cada pulso, la corriente

aumenta un poco hasta el fin del período de tiempo en que los dos transistores estén encendidos, y esto ocurrirá cuando el motor haya recorrido lo suficiente para apagar el transistor 5. En este ejemplo, eso ocurriría cuando el rotor haya girado 60 grados eléctricos y no en 60 grados físicos. El siguiente paso es cuando el transistor 5 es desactivado y el 6 es disparado.

Entre los pulsos y las etapas de operación, la corriente inductivamente continuará fluyendo, ya que la corriente no puede ser creada ni destruida instantáneamente en un circuito inductivo, es aquí donde los diodos que están en polarización inversa tienden a conducir la corriente a través de los transistores 2 y 4. Esta corriente decaerá inmediatamente dando los efectos para compensar el par en el motor y darle carga al Buss, al menos que el motor esté girando a una gran carga de inercia en el eje y esté girando a una velocidad alta; esto tendrá muy poco efecto, después de que el motor haya girado 60 grados eléctricos de la posición ilustrada en la figura 42; el transistor 5 se desactivara y la corriente en T11, T8, T5 y T12 decaerá completamente; el transistor 6 seguirá con la operación y entonces el flujo de corriente será a través de T1, T4, T7, T10 hacia el centro de la Y, y estará saliendo a través de T12, T9, T6, T3. Los polos magnéticos del estator se habrán deslizado 60 grados, y obligarán al rotor a continuar su rotación en la misma dirección.

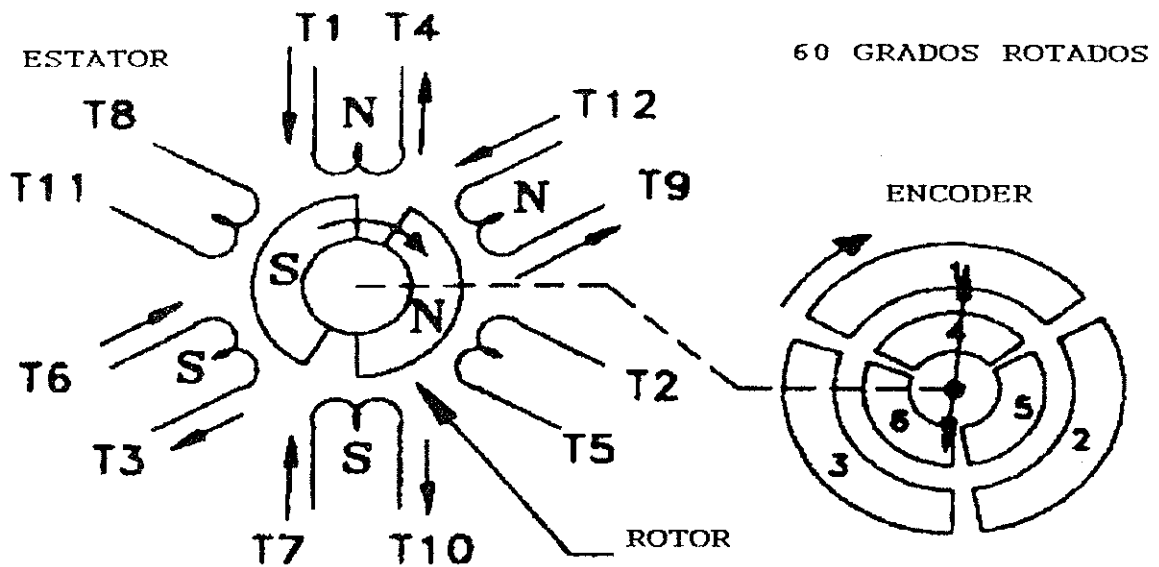
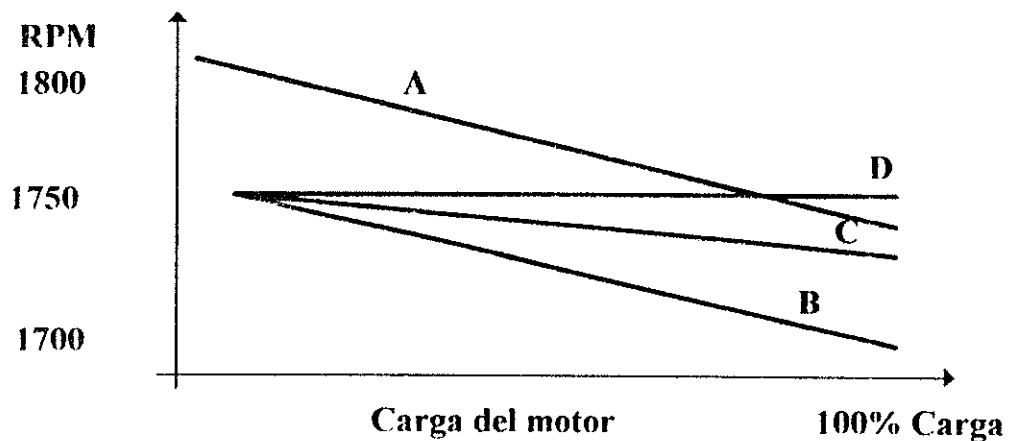


Figura 42. Situación del motor después de haber girado 60 grados eléctricos.

En general, el motor CD Sin Escobillas presenta mayores ventajas que el motor CD tradicional, ya que no incurre en escobillas ni en un colector, el cual haya que rectificar y una mejor regulación de velocidad bajo carga que los otros tipos de motores. (Ver figura 43)



- A. Motor de inducción
- B. Motor de inducción con control inversor de frecuencia
- C. Motor CD con retroalimentación con tacómetro
- D. Motor CD sin escobillas.

Figura 43. Comparación de regulación de velocidad entre los diferentes motores eléctricos.



De la figura anterior, se puede observar que el motor CD sin escobillas muestra gran estabilidad independientemente de la carga que se le aplique al motor, por lo que este tipo de motor ya se está utilizando en varias procesos en la industria.

## APÉNDICE 2

### Rectificador Controlado De Silicio SCR

Los SCR son diodos rectificadores controlados, los cuales constan de tres terminales Ánodo(+), Cátodo(-), Compuerta(G) (Ver figura 44). Para lograr que un SCR esté en conducción, se le aplica un voltaje en la compuerta G, para lo cual sólo se necesita de un pulso de voltaje para dejar en conducción el elemento.

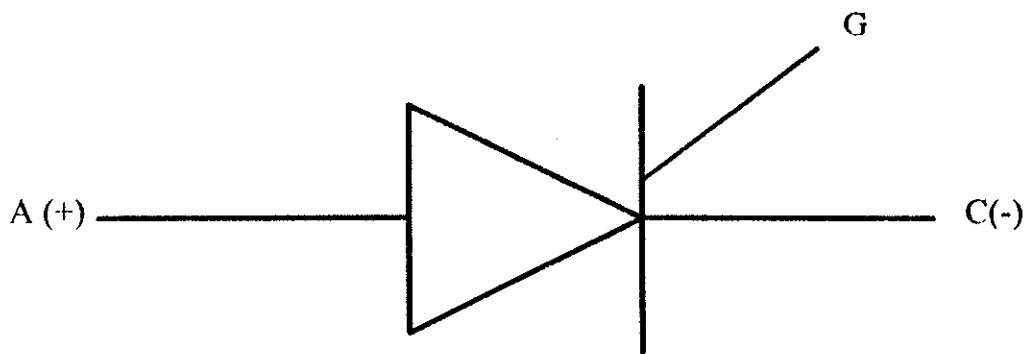


Figura 44, Símbolo de un SCR

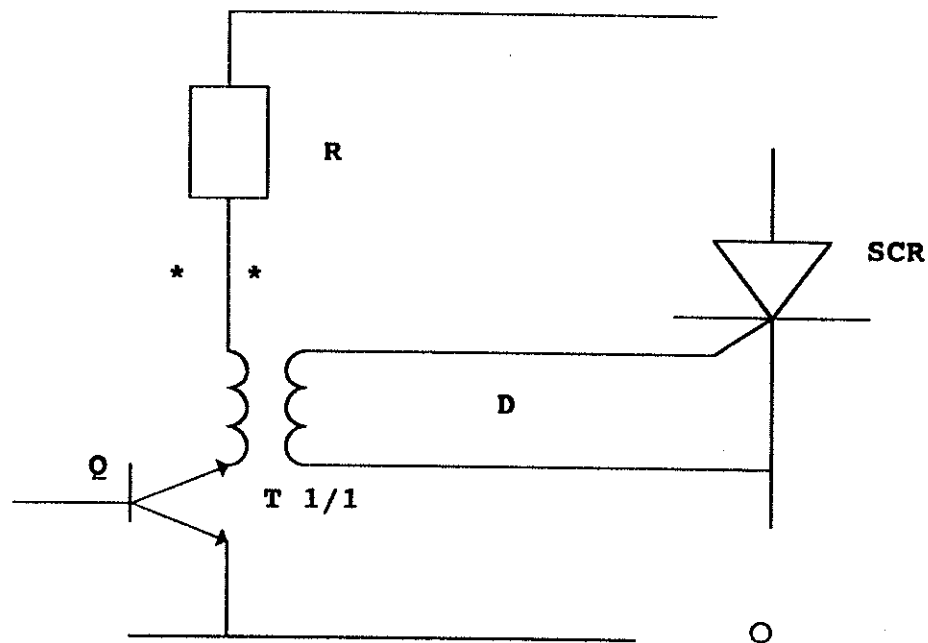
Para desconectar un SCR existen dos formas:

- 1.- Desconectar el flujo de corriente en el mismo.
- 2.- Invertir la dirección de la corriente que fluye a través del mismo o aplicarle un voltaje igual y opuesto al que tiene entre ánodo y cátodo.

### Disparo Del SCR.

Para lograr el disparo de un tiristor, se necesita de un circuito de disparo y que esté aislado el sistema de potencia del sistema electrónico. En la figura 45, se

representa un circuito de disparo, que consiste en un transistor conectado en emisor común:



**Figura 45,** Circuito de disparo de un SCR.

En el circuito de la figura 45, para lograr el disparo del tiristor, se necesita inyectarle un voltaje en la base de Q para que éste entre en saturación y fluya corriente en el primario del transformador de impulsos, y produzca así un pulso a la compuerta del tiristor a través del secundario del transformador. Cuando se apaga el transistor, el flujo en el núcleo el transformador termina, e induce así un voltaje en el secundario, en sentido opuesto al inducido cuando se enciende el transistor. El diodo D cortocircuita este pulso, y evita que este llegue al primario y también devuelve parte del pulso cuando el transistor se apaga.

## LISTADO DE PROGRAMA

### ANALISIS DE UN MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA EN ORDENADOR

```

PROGRAM MOTOR;
  { $E+ } { $B+ } { $G- } { $A+ } { $L+ } { $R }

  USES CRT, GRAPH;
  VAR
  K: CHAR;
  CONST
  VARIACION=0.001;
  LABEL 1,2;
  PROCEDURE PANINGR;
    VAR
      x,f,c: integer;

    begin
      for c:=2 to 23 do
        begin
          gotoxy(1,c); write(' ');
          gotoxy(76,c); write(' ');
        end;
        gotoxy(1,1); write(' F ');
        gotoxy(76,1); write(' ');
        gotoxy(1,24); write(' E ');
        gotoxy(76,24); write(' B ');
        gotoxy(75,3); write(' F ');
        gotoxy(f,3); write(' ');
        FOR F:=2 TO 75 do
          begin
            gotoxy(f,3); write('=');
            gotoxy(f,1); write('=');
            gotoxy(f,24); write('=');
          end;
        end;

  PROCEDURE EJES;
  var
    cod4,y1,x1,Mx,X,MY,Gd, Gm : Integer;
  begin
    Gd := Detect; InitGraph(Gd, Gm, '');
    if GraphResult (<) grOk then Halt(1);
    Randomize;
    MX:=GETMAXX;
    MY:=GETMAXY;
    LINE(ROUND(0.0312*MX),ROUND(0.0760*MY),ROUND(0.9812*MX),ROUND(0.0730*MY));
    LINE(ROUND(0.0469*MX),ROUND(0.0977*MY),ROUND(0.0469*MX),ROUND(0.1044*MY));
    OUTTEXTXY(ROUND(0.0312*MX),ROUND(0.0872*MY),'0');
    OUTTEXTXY(ROUND(0.0203*MX),ROUND(0.7995*MY),'10');
    OUTTEXTXY(ROUND(0.0203*MX),ROUND(0.7223*MY),'20');
    OUTTEXTXY(ROUND(0.0203*MX),ROUND(0.6454*MY),'30');
    OUTTEXTXY(ROUND(0.0203*MX),ROUND(0.5678*MY),'40');
    OUTTEXTXY(ROUND(0.0203*MX),ROUND(0.4906*MY),'50');
    OUTTEXTXY(ROUND(0.0203*MX),ROUND(0.4133*MY),'60');
    OUTTEXTXY(ROUND(0.0203*MX),ROUND(0.3361*MY),'70');
    OUTTEXTXY(ROUND(0.0203*MX),ROUND(0.2588*MY),'80');
    OUTTEXTXY(ROUND(0.0203*MX),ROUND(0.1816*MY),'90');
  
```

```

OUTTEXTXY(ROUND(0.0078*MX),ROUND(0.1043*MY),'100');
OUTTEXTXY(ROUND(0.0109*MX),ROUND(0.06*MY),'Z');
OUTTEXTXY(ROUND(0.1314*MX),ROUND(0.8872*MY),'10');
OUTTEXTXY(ROUND(0.2237*MX),ROUND(0.8872*MY),'20');
OUTTEXTXY(ROUND(0.3161*MX),ROUND(0.8872*MY),'30');
OUTTEXTXY(ROUND(0.4084*MX),ROUND(0.8872*MY),'40');
OUTTEXTXY(ROUND(0.5007*MX),ROUND(0.8872*MY),'50');
OUTTEXTXY(ROUND(0.5931*MX),ROUND(0.8872*MY),'60');
OUTTEXTXY(ROUND(0.6854*MX),ROUND(0.8872*MY),'70');
OUTTEXTXY(ROUND(0.7777*MX),ROUND(0.8872*MY),'80');
OUTTEXTXY(ROUND(0.8701*MX),ROUND(0.8872*MY),'90');
OUTTEXTXY(ROUND(0.9546*MX),ROUND(0.8872*MY),'100');
OUTTEXTXY(ROUND(0.7042*MX),ROUND(0.94*MY),'Z');
OUTTEXTXY(ROUND(0.3161*MX),ROUND(0.94*MY),'CURVA TORQUE. Ia, W, Vs tiempo');
end;

```

```

PROCEDURE GRAFICA;

```

```

var
    TAU,F1,F2,F3,E1,E2,E3,X1,X2,D1,A1,B1,C1,rpm,t,Tam,Mm,n,Hp,Va,Vf,Lf,La,Laf,Ra,Rf,N,B,J,Ic,TORQUE:REAL;
    Ia,Wt,A,DIF:extended;
    K1,K2,K3,K4,K5,K6,K7,K8,K9,K10,K11,K12,NALE,
    Xmax,Ymax,tl,wl,il,Tt1,IaPORC,TPORC,TORQUEPORC,Wporc,Imax,Wmax,Tamax,tmax,L,M,Rarr,Ea:REAL;
    D,D2,Mx,My,I,L1,L2,L3,L4,L5:INTEGER;
    TIPD,P:CHAR;
    NUMEROF1,NUMEROF2,NUMEROF3,NUMEROE1,NUMEROE2,NUMEROE3,NUMEROX1,NUMEROX2,NUMEROTI,NUMEROIa,NUMEROWn:STRING(8);

```

```

begin

```

```

    MY:=GETMAXy;
    MX:=GETMAXx;
    CLRSCR;
    PANINGR;
    GOTOXY(25,2); writeln('PROGRAMA CORRIENTE DIRECTA');
    GOTOXY(15,6); write('INGRESE LOS VALORES NOMINALES DEL MOTOR DC');
    GOTOXY(25,13); write('TRABAJA UN EJEMPLO');
    GOTOXY(31,14); WRITELN('SI = S');
    GOTOXY(31,15); WRITELN('NO = N');
    GOTOXY(31,16); READLN(P);
    clrscr;

```

```

    if P='S' then

```

```

        begin

```

```

            PANINGR;
            GOTOXY(25,2); writeln('PROGRAMA CORRIENTE DIRECTA');
            hp:= 5;
            n:= 1273;
            Va:= 240;
            Vf:= 240;
            Ra:=0.6;
            Rarr:=0;
            Rf:=240;
            La:=0.012;
            Lf:=120;
            R:= 0.35;
            J:= 1.20;
            Ia:=16;
            GOTOXY(30,8);WRITELN('DATOS DEL MOTOR');
            GOTOXY(35,9);WRITELN(' hp:= 5');

```

```

GOTOXY(35,10);WRITELN(' n:= 1273');
GOTOXY(35,11);WRITELN(' Va:= 240');
GOTOXY(35,12);WRITELN(' Vf:= 240');
GOTOXY(35,13);WRITELN(' Ra:=0.6');
GOTOXY(35,14);WRITELN(' Rf:=240');
GOTOXY(35,15);WRITELN(' La:=0.012');
GOTOXY(35,15);WRITELN(' Lf:=120');
GOTOXY(35,16);WRITELN(' B:= 0.35');
GOTOXY(35,17);WRITELN(' J:= 1.20');
GOTOXY(35,18);WRITELN(' In:= 16');
GOTOXY(35,19);WRITELN(' Rarr:= 0');
READLN;

```

```

GOTOXY(4,7); write('ESPERE UN MOMENTO POR FAVOR');
end;
CLRSCR;
FANINGR;
IF P='N' THEN
  BEGIN
    GOTOXY(25,2); writeln('PROGRAMA CORRIENTE DIRECTA');
    GOTOXY(4,4); writeln('TIPO MOTOR');
    GOTOXY(4,5);writeln('DERIVACION = D');
    GOTOXY(4,6);writeln('SEPARADO = S');
    gotoxy(15,7);READ(TIPO);
    GOTOXY(10,8); write('POTENCIA DEL MOTOR EN HP = ');
    gotoxy(60,8);Readln(Hp);
    GOTOXY(10,9); write('CORRIENTE NOMINAL In = ? AMPS. ');
    gotoxy(60,9);Readln(Ia);

    GOTOXY(10,10); write('RPM DEL MOTOR N = ');
    gotoxy(60,10);readln(N);
    REPEAT
      BEGIN
        IF N=0 THEN
          BEGIN
            GOTOXY(10,10); WRITELN("OPERACION IMPOSIBLE", INGRESE N = ');
            GOTOXY(60,10);READ(N);
          END;
        END;
      UNTIL N<>0;
    GOTOXY(10,11); Write('VOLTAJE DE ARMADURA Va = ');
    gotoxy(60,11);Readln(Va);
    IF TIPO='D' THEN BEGIN
      Vf:=Va;
      GOTOXY(10,12);writeln('OBSERVACION Vf= Va');
    END
    ELSE IF TIPO='S' THEN
      BEGIN
        GOTOXY(10,12); Writeln('VOLTAJE DE CAMPO Vf = ');
        gotoxy(60,12);Readln(Vf);
        REPEAT
          BEGIN
            IF Vf=0 THEN
              BEGIN
                GOTOXY(10,12);WRITELN("OPERACION IMPOSIBLE", INGRESE Vf = ? 0');
                GOTOXY(60,12);READLN(Vf);
              END;
            END;
          UNTIL Vf<>0;
        END;
      GOTOXY(10,13); Writeln('RESISTENCIA DE CAMPO Rf = ? 0 ');

```

```

gotoxy(60,13);ReadLN(Rf);
GOTOXY(10,14); WriteLN('RESISTENCIA DE ARMADURA Ra = ? Ω ');
gotoxy(60,14);ReadLN(Ra);
GOTOXY(10,15); WriteLN('RESISTENCIA DE ARRANQUE Rarr = ? Ω ');
gotoxy(60,15);ReadLN(Rarr);
GOTOXY(10,16); writeLN('INDUCTANCIA DE ARMADURA La = ? HENRIOS ');
gotoxy(60,16);Read(La);
GOTOXY(10,17); writeLN('INDUCTANCIA DE CAMPO Lf = ? HENRIOS ');
gotoxy(60,17);ReadLn(Lf);
GOTOXY(10,18); WriteLN('CTE. FRICCION MOTOR Y CARGA B = ? KG-m^2 ');
gotoxy(60,18);READLN(B);
GOTOXY(10,19);WriteLN('CTE. INERCIA MOTOR Y CARGA J = ? N-Seg/a');
gotoxy(60,19);READLN(J);
    REPEAT
        BEGIN
            IF J =0 THEN
                BEGIN
                    GOTOXY(10,19);WRITELN("OPERACION IMPOSIBLE", INGRESE J = ? Ω');
                    GOTOXY(60,19);READLN(J);
                END;
            END;
        UNTIL J<>0;
    end;
    closegraph;
    Ic:=Vf/Rf;
    (CALCULO DE LAS CONSTANTES PARA ECUACIONES TRANSITORIAS)
    Ea:= Va-Ia*Ra;
    w:=2*PI*N/60;
    Laf:=Ea/(Ic*w);
    Ra:=Ra+Rarr;
    A1:=1;
    B1:=(B/J + Ra/La);
    C1:=(Ra*B)/(La*J) + SQR(Ic*Laf)/(La*J);
    D1:=SQR(B1)-4*C1;
    X1:=(-B1 + SQR(D1))/2;
    X2:=(-B1 - SQR(D1))/2;
    E1:=(Va/La)*(B/J)/(X1*X2);
    E2:=(Va/La)*(X1 + B/J)/(X1*(X1 - X2));
    E3:=(Va/La)*(X2 + B/J)/(X2*(X2 - X1));
    F1:=((Laf*Ic*Va)/(J*La))/(X1*X2);
    F2:=((Laf*Ic*Va)/(J*La))/(X1*(X1-X2));
    F3:=((Laf*Ic*Va)/(J*La))/(X2*(X2-X1));
    CLRSCR;
    Xmax:=(0.9812-0.0312)*GETmaxX;
    Ymax:=(0.0877-0.1044)*GETmaxY;
    DIF:=0.1;
    imax:=0;
    tonax:=0;
    tmax:=0;
    WT:=0;
    L4:=0;
repeat
    BEGIN
        L4:=L4+1;
        A:=WT;
        Ia:= E1 + E2*EXP(X1*t) + E3*EXP(X2*t);
        if Ia>imax then imax:=Ia;
        Wt:= F1 + F2*EXP(X1*t) + F3*EXP(X2*t);

```

```

Wt:=60*Wt/(2*PI);
TORQUE:=Laf*Ic*Ia;
IF TORQUE>tomax then tomax:=torque;
t:= t + variacion;
tmax:=t;
GOTOXY(4,5);WRITELN('EL VALOR DE Ia = ',Ia:5:2,' Wt:= ', Wt:5:2,' TORQUE= ', TORQUE:5:2);
IF L4>100 THEN DIF:=ABS(Wt-A);
GOTOXY(4,6);WRITELN('Wt-A = ',DIF:5:3,' L4= ',L4);
WMAX:=WT;
END
UNTIL DIF<=0.001;
DELAY(3000);
Gotoxy(4,7);WRITE('LOS VALORES MAXIMOS DE X Y Y ',XMAX:4:2,' ',YMAX:4:2);
gotoxy(4,6);writelN('imax= ',imax:5:2,'tomax = ',tomax:5:2,' wmax= ',wmax:5:2,' TMAX = ',TMAX:5:2);

CLASCR;
L1 :=1;
L2:=1;
L3:=1;

EJES;
Ia:=0;
t:=0;
Wt:=0;
Torque:=0;

WHILE Wt<=Wmax DO
BEGIN
t:= t + variacion;
A:=Wt;
t1:=t;
i1:=ia;
w1:=Wt;
Tt1:=torque;
Ia:= E1 + E2*EXP(X1*t) + E3*EXP(X2*t);
Wt:= F1 + F2*EXP(X1*t) + F3*EXP(X2*t);
Wt:=60*Wt/(2*PI);
TORQUE:=Laf*Ic*Ia;
K1:=0.0469*MX+Xmax*(t1/tmax);
K2:=0.0768*MY-YMAX*(I1/IMAX);
K3:=0.0469*MX +XMAX*(t/tmax);
K4:=0.0768*MY-YMAX*(Ia/Imax);
K5:=0.0469*MX+Xmax*(t1/tmax);
K6:=0.0768*MY-ymax*(W1/Wmax);
K7:=0.0469*MX+Xmax*(t/tmax);
K8:=0.0768*MY-ymax*(WT/Wmax);
K9:=0.0469*MX+Xmax*(t1/tmax);
K10:=0.0768*MY-yMAX*(TT1/TOMAX)*0.7;
K11:=0.0469*MX+Xmax*(t/tmax);
K12:=0.0768*MY-YMAX*(TORQUE/TOMAX)*0.7;
SetLineStyle(SOLIDLN,0,NORMwidth);
LINE(ROUND(K1),ROUND(K2),ROUND(K3),ROUND(K4));
SetLineStyle(SOLIDLN,2,THICKwidth);
LINE(ROUND(K5),ROUND(K6),ROUND(K7),ROUND(K8));
SetLineStyle(12,$C3,NORMWIDTH);
LINE(ROUND(K9),ROUND(K10),ROUND(K11),ROUND(K12));
SETTEXTSTYLE(DEFAULTFONT,0,1);

```



```

IF L1=1 THEN OUTTEXTXY(ROUND(0.0469*MX)+40,ROUND(0.1700*MY)-20,'Ia');
IF L2=1 THEN OUTTEXTXY(ROUND(0.0768*MX)+20,ROUND(0.1700*MY)-10,'Mt');
IF L3=1 THEN OUTTEXTXY(ROUND(0.1070*MX)+30,ROUND(0.9000*MY)-30,'T A 70%');
L1:=0;
L2:=0;
L3:=0;

END;
REPEAT
  NALE:=RANDOM;
UNTIL KEYPRESSED;

CLOSEGRAPH;
CLRSCR;
end;

```

```

Procedure Pantalla;
Var
  grDriver,grMode,Errcode:Integer;
begin
  grdriver:=detect;
  initgraph(grDriver,grMode,'');
  ErrCode:=Graphresult;
  setColor(4);
  if (ErrCode<>grOk) then
  Begin
    writeln('ERROR EN GRAFICAS',GraphErrorMsg(ErrCode));
    readln;
    Halt(1);
  End
  Else Begin
    SETCOLOR(GETMAXCOLOR);
    SetLineStyle(solidln,$C3,thickwidth);
    rectangle(0,0,GetmaxX,GetmaxY);
    SetTextStyle(0,HorizDir,2);
    SETVIEWPORT(0,0,GETMAXx,GETMAXy,CLIPoN);
  End
End;

```

PROCEDURE PRESENTACION;

```

VAR
  gd,gm,x4,y4,ax,ay:integer;
  nale:real;
begin
  gd:=detect;
  initgraph(gd,gm,'');
  if graphresult<>Grok then halt(1);
  ax:=getmaxX;
  ay:=getmaxY;
  LINE(ROUND(0.0078*MX),ROUND(0.0104*MY),ROUND(0.0078*MX),ROUND(0.9895*MY));
  LINE(ROUND(0.0078*MX),ROUND(0.0104*MY),ROUND(0.9921*MX),ROUND(0.0104*MY));
  LINE(ROUND(0.0078*MX),ROUND(0.9895*MY),ROUND(0.6791*MX),ROUND(0.9895*MY));
  LINE(ROUND(0.6791*MX),ROUND(0.9895*MY),ROUND(0.6791*MX),ROUND(0.8977*MY));
  LINE(ROUND(0.6791*MX),ROUND(0.8977*MY),ROUND(0.9921*MX),ROUND(0.8977*MY));
  LINE(ROUND(0.9921*MX),ROUND(0.0104*MY),ROUND(0.9921*MX),ROUND(0.8977*MY));

```

GOTOXY(35,15);WRITELN('Lf:=120');

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central