

47
2ij

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN



**Diseño, Puesta en Marcha, Control y Mantenimiento
de Motores de Corriente Directa.
Métodos Generales de Control de Velocidad
para Motores de Corriente Directa.**

**TRABAJO DE SEMINARIO
Que para obtener el Título de :
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**Presenta:
HÉCTOR GÓMEZ PIÑA**

**Asesor :
Ing. Sabás Flores Ascencio**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Cuautitlan Izcalli , Edo. de México.

1996



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
PRESENTE.

AT'N: ING. RAFAEL RODRIGUEZ CEBALLOS
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES-C.

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautilán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Diseño, Puesta en Marcha, Control y Mantenimiento
de Motores de Corriente Directa, Métodos Generales
de Control de Velocidad para Motores de Corriente
Directa.

que presenta el pasante: Héctor Gómez Piña,

con número de cuenta: 8509028-0 para obtener el Título de:
Ingeniero Mecánico Electricista.

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO.

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautilán Izcalli, Edo. de México, a 26 de Febrero de 1996

MODULO:	PROFESOR:	FIRMA:
<u>2</u>	<u>Ing. Anselmo Ancoá Torres</u>	<u>[Firma]</u>
<u>3</u>	<u>Ing. Sabás Flores Ascencio</u>	<u>[Firma]</u>
<u>4</u>	<u>Ing. Victor Hugo Landa Orozco</u>	<u>[Firma]</u>

DEP/VOBOSM

AGRADECIMIENTOS.

A mis Padres. Por el apoyo y cariño que siempre he tenido.

A mis Hermanos. Por darme todo su ejemplo a través de los años

A mis Amigos. Quienes me hacen recordar tiempos difíciles.

A toda esa Gente. De que de algún modo me motivo a seguir adelante.

ÍNDICE

ÍNDICE	1
<u>INTRODUCCIÓN.</u>	2
1.- GENERALIDADES DE UNA MÁQUINA DE C.D.	5
1.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LA MÁQUINA DE C.D.	5
1.2 ESTRUCTURA DE UNA MÁQUINA DE C.D. *	8
1.3 - ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE VELOCIDAD DE UNA MÁQUINA DE C.D.	11
2.- CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DE C.D. DE ACUERDO AL TIPO DE CONEXIÓN.	15
2.1 CONEXIÓN TIPO PARALELO.	15
2.2 CONEXIÓN TIPO SERIE.	20
2.3 CONEXIÓN TIPO COMPUESTO.	24
3.- MÉTODOS GENERALES DE CONTROL DE VELOCIDAD.	29
3.1 - CONTROL POR CAMPO	29
3.2 - CONTROL POR ARMADURA.	31
3.3 CONTROL POR VOLTAJE EN ARMADURA.	35
CONCLUSIONES.	38
BIBLIOGRAFÍA.	39

INTRODUCCIÓN

Dentro del desarrollo histórico de los motores, los motores de corriente directa fueron los primeros en utilizarse, ya que la energía que primero se conoció fue la llamada galvánica; obtenida de baterías especiales de c.d.

Las máquinas de c.d.; en sí transforman energía dependiendo de la función que realizan, son máquinas generadoras si transforman la energía de mecánica a eléctrica o máquinas motoras si realizan la conversión de eléctrica a mecánica.

Hoy en día los motores de corriente directa se emplean en forma extensa en la industria por su gran capacidad para cumplir con las exigencias de par y velocidad (característica mecánica) esto debido a la versatilidad que tiene para conectarse en distintas formas.

Aunque la tecnología avanza a grandes pasos y proporcione a los motores de corriente alterna sistemas de control de frecuencia variable para impulsión a una velocidad ajustable; el motor de corriente directa seguirá siendo el más indicado para ciertas aplicaciones debido a su característica mecánica. Pues resulta más sencillo gobernar variables como velocidad, freno, aceleración, inversión de giro, etc.

De lo anterior también podemos hacer mención que no necesariamente se requiere de un motor de c.d. para poder lograr un control de velocidad dado o específico, ya que también existe la máquina síncrona con la cual se puede lograr una velocidad constante; pero que tiene la característica de no poseer par propio. Así también cabe mencionar que en una máquina de inducción se puede lograr un control de velocidad por medio de controladores de frecuencia variable, teniendo como característica el frenarse al aumentar su carga dos veces la nominal.

Así pues el motor de corriente directa es el más indicado para lograr una característica de par-velocidad; ya que puede lograrse una velocidad específica y manejar cargas hasta 3 veces la nominal.

En general este tipo de máquinas se complementa una de la otra; ya que para la utilidad de una ; la otra no es la óptima, y viceversa.

Por ejemplo, las características generales de una máquina síncrona son:

- Velocidad constante o síncrona.
- No posee par de arranque propio.
- Utiliza doble excitación c.d. (rotor) y c.a. (estator)
- Se arranca como un motor de inducción.

Como puede apreciarse, estas características pueden representar ventajas y desventajas dependiendo de la aplicación específica, por ejemplo, si se pretende mejorar factor de potencia, un motor síncrono es el ideal, pero si lo que se pretende o busca es un par que se incremente con la carga (elevadores) un síncrono o uno de inducción no sería el adecuado, más bien el caso requiere un motor c.d. conectado en serie.

Por otro lado, los motores de rotor devanado tienen la posibilidad de variar velocidad, tienen mayor par y potencia comparados con uno de jaula de ardilla, pero para aplicaciones que requieren, buen par, control preciso de velocidad, freno, inversión de giro resulta mucho más sencillo y conveniente un motor de c.d., a pesar de que su costo es en general, más elevado que un motor de c.a. de la misma potencia, sin embargo esto se equilibra cuando se comparan los equipos de control, sobre todo de velocidad, pues mientras dicho equipo es relativamente económico para motores c.d., es caro para motores c.a.

CAPÍTULO 1

1.- GENERALIDADES DE UNA MÁQUINA DE C.D.

1.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LA MÁQUINA DE C.D.

Si se dispone de un campo magnético y dentro de él existe un conductor en forma de espira, a partir de este circuito básico se puede obtener el principio de operación de una máquina de c.d.

Si a partir del circuito básico existe una variación o movimiento en la espira se creará una Fuerza Electromotriz (FEM). Ver fig. 1

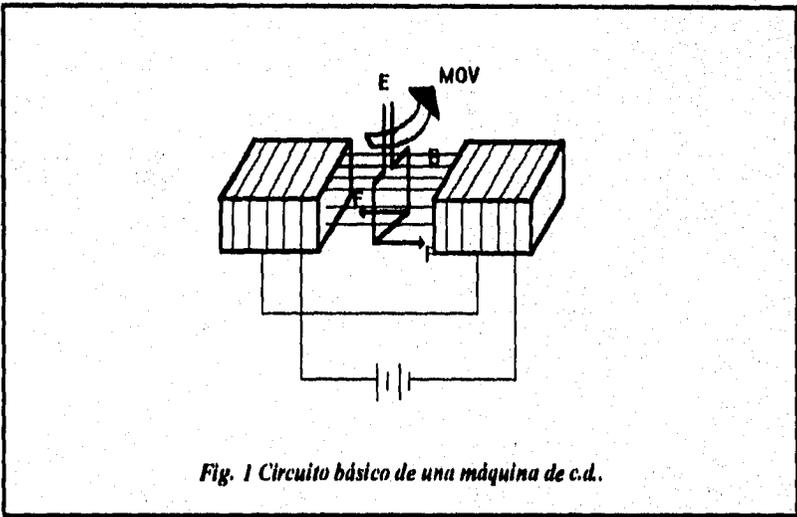


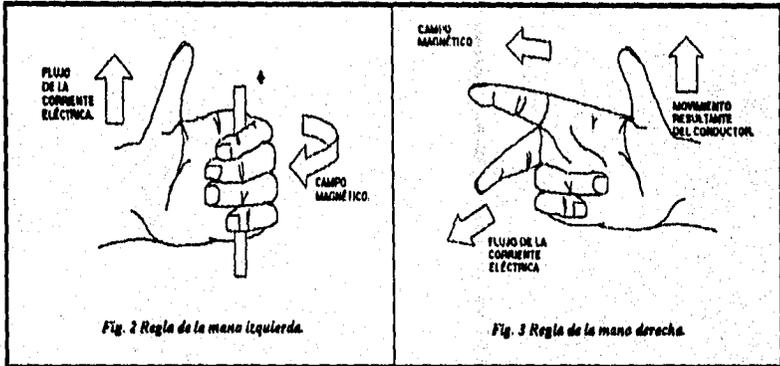
Fig. 1 Circuito básico de una máquina de c.d.

$$E = \beta \ l \ v \times 10^{-3} \ \text{Volts}$$

donde: E = Fuerza Electromotriz (FEM inducida).
 β = Densidad de campo.
 l = Longitud del conductor
 v = Velocidad con la cual se mueve el conductor.

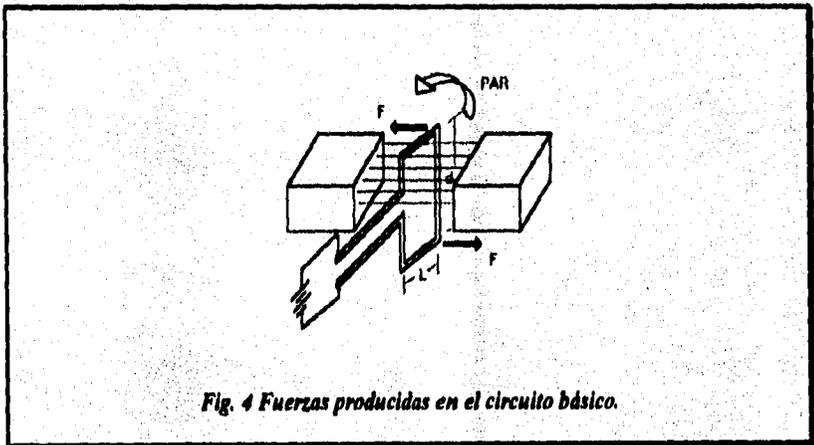
Considerando que para entender el funcionamiento del motor se necesita comprender como se relacionan las variables que interactúan en el principio electromagnético, se establecen las siguientes reglas para los motores:

Regla de la mano izquierda; indica la dirección de las líneas de flujo que hay alrededor de un conductor que lleva corriente. El pulgar indica el flujo de la corriente eléctrica y los demás dedos señalan la dirección de las líneas de fuerza magnéticas. Ver fig. 2.



Regla de la mano derecha; para motores de c.d. indica la dirección en que un conductor con corriente se moverá en un campo magnético. Cuando el índice señala en dirección de las líneas de campo magnético y el dedo medio se alinea en la misma dirección que la corriente del conductor, el pulgar señala hacia donde se moverá el conductor. Ver fig. 3

Si a la espira dentro del campo magnético se le alimenta con una corriente eléctrica como se muestra en la fig. 4; en ella se originaran dos fuerzas contrarias creando un par y un giro perpendicular a las líneas de flujo.



La fuerza que produce el par de giro se obtiene con la expresión.

$$F = \beta I l \cos \phi$$

Donde:

F= Fuerza (Newton)

β = Densidad de flujo magnético (Weber/m²)

l = Longitud de un lado de la espira (m)

θ = Ángulo que forma el eje transversal de la espira con la dirección del flujo magnético.

De la ecuación anterior se puede obtener la expresión para calcular el par de giro.

$$T = F \times d.$$

$$T = \beta I l d \cos \theta$$

Siendo d la distancia entre los dos conductores.

La expresión para el par se puede escribir en función del área (A) de la espira cuyo valor es $A = l \times d$ y recordando que el flujo magnético en términos de la densidad del flujo y el área de la espira que corta es $\phi = \beta A$

$$\Rightarrow T = \beta I l d \cos \theta$$

$$T = \beta I A \cos \theta$$

$$T = \phi I \cos \theta \quad \text{N-m}$$

De lo anterior se puede afirmar que el par es directamente proporcional a la cantidad de flujo magnético que atraviesa la espira y a la corriente que conduce la misma.

Bajo este principio se basan los motores eléctricos; es decir, alimentando la espira con una corriente eléctrica se obtiene un par mecánico, entendiéndose por par a la acción de dos fuerzas iguales F_1 y F_2 que son paralelas pero de sentido contrario.

1.2 ESTRUCTURA DE UNA MÁQUINA DE C.D.

La máquina de c.d. esta constituida por partes electromagnéticas y partes mecánicas.

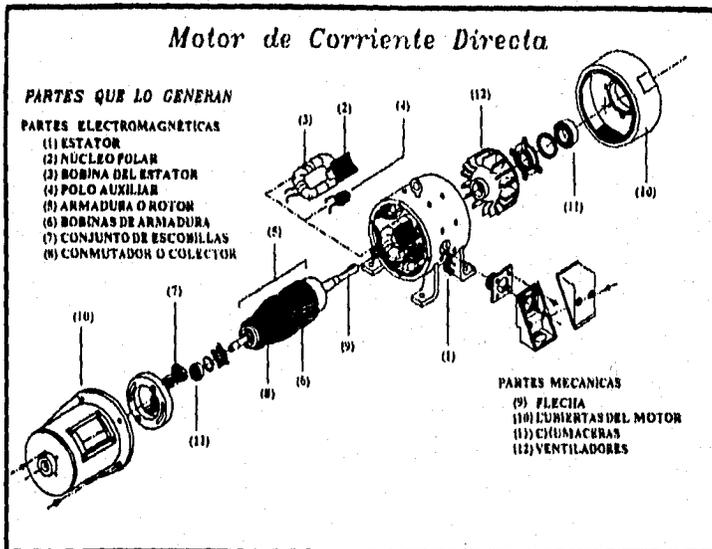


Fig. 5

Partes electromagnéticas.

1.- Estator: El estator de las máquinas de c.d. está constituido por el yugo o carcasa que es básicamente un cilindro de acero, hierro y hasta chapa laminada, su sección es de forma variable y no se encuentra sujeta a variaciones de flujo, su trabajo es más bien mecánico ya que tiene la función de soportar los polos y por medio de las cubiertas soportar el rotor o armadura.

2.- Núcleo polar: El núcleo polar o polos constituyen la parte principal del circuito magnético del estator, se pueden construir de forma maciza o bien en laminaciones, esta última es preferida normalmente con lo que se logra absorber ligeras variaciones de flujo debidas al paso del flujo del polo al rotor. Las laminaciones, tienen un recubrimiento de barniz aislante y están unidas entre sí por medios mecánicos. Estas laminaciones son de 1.0 a 1.2 mm de espesor y por lo general las laminaciones y la zapata polar son del mismo material.

El polo está constituido de una parte que es de sección cuadrada o rectangular en la cual se alojan las bobinas, y de una expansión o zapata polar que es localizada en la extremidad del polo.

3.- Bobina del estator: Estas bobinas pueden ser constructivamente diferentes, según sea el tipo de excitación de la máquina. Desde el punto de vista de las características constructivas de estas bobinas, se puede decir que en las máquinas con excitación en derivación, las bobinas inductoras (en los polos) están constituidas de muchas espiras de alambre aislado de sección relativamente pequeña.

En las máquinas con excitación en serie las bobinas inductoras están formadas de pocas espiras de conductor y de sección mayor al de las bobinas en derivación.

En las máquinas con excitación compuesta se tienen dos bobinas por polo de construcción semejante. Una bobina para la conexión en derivación y la otra para la conexión en serie.

4.-Polo auxiliar: Su principal función del polo auxiliar es mejorar la conmutación. Estos polos se encuentran localizados en la parte media de los polos principales. El polo auxiliar está formado de un núcleo de sección mas pequeña que el principal, su bobina es similar a la que se inserta a un polo principal pero con la característica de poseer alambre de mayor calibre. El polo auxiliar se conecta en serie con la armadura.

5.-Armadura o Rotor: -La armadura es la parte giratoria de las máquinas de c.d. está constituida por las bobinas del inducido y el colector. La armadura está formada por un núcleo de discos o anillos ranurados de lamina que van montados en la flecha una tras de otra. Las laminaciones están hechas por lo general de un espesor de 0.4 a 0.5. mm y es deseable que sean tan delgadas como sea posible para reducir las pérdidas en la armadura.

Las ranuras de la armadura sirven para alojar las bobinas de armadura o rotor y se localizan en la periferia de este, pudiendo haber distintos tipos de ranuras, dependiendo del tamaño, velocidad de operación, y tipo de conductor para las bobinas.

6.-Bobinas de armadura: Las bobinas de la armadura son colocadas en las ranuras de está; su sección y aislamiento corresponden al tipo de corriente y voltaje a manejar.

7.-Conjunto de escobillas: Las escobillas sirven para permitir el paso de la corriente al colector y se ajustan sobre éste en forma de contacto a presión por medio del portaescobillas. Se fabrican por lo general de cuatro tipos:

- De metal grafito. (Para alta velocidad)
- De electro-grafito. (Para baja velocidad)
- De carbón grafito.
- De grafito.

8.-Commutador o colector: El colector de las máquinas de corriente continua está constituido por una serie de segmentos de cobre duro de sección trapezoidal, los segmentos se encuentran eléctricamente aislados y separados por hojas de mica de 0.8 mm de espesor.

Los segmentos de cobre con su aislamiento se unen de modo que forman un cilindro hueco que se monta sobre la flecha y se sujeta por medio de anillos. El aislamiento de mica entre segmentos o delgas del colector debe estar ligeramente sumido con respecto al cobre para evitar que se dañen las escobillas que están en contacto.

Partes mecánicas.

9.-Flecha: La flecha de cualquier máquina eléctrica giratoria se construye por lo general con acero de alta calidad, se le procesa mecánicamente por torneado y rectificación; y posteriormente se somete a tratamiento térmico. En la mayoría de los casos se construyen flechas macizas y sólo en máquinas de gran potencia se construyen tubulares para reducir el peso.

10.-Cubiertas del motor: Las tapas o cubiertas del motor son las que soportan la parte giratoria (armadura) por medio de las chumaceras que están alojadas en las mismas.

11.-Chumaceras: Los cojinetes o chumaceras que se utilizan en las máquinas de c. d. por lo general son de: Esfera o bolas y de balas o cilíndricos. La aplicación de estos esta en función de la velocidad y el tamaño del motor.

12.-Ventilador: El ventilador esta constituido de metal rígido que contiene aspas que permiten la ventilación del motor y evitar pérdidas por efecto Joule.

En general la máquina de c.d. es de polos salientes situados en el estator. En estos polos se alojan varias bobinas, llamadas bobinas de campo, que pueden conectarse en diversas maneras a un suministro de corriente directa.

El rotor es una estructura cilíndrica en la que se alojan bobinas distribuidas en ranuras y conectadas a un conmutador de delgas. Estas bobinas se designan como bobinas de armadura. El conmutador de delgas es el que entra en contacto con las escobillas y permite la alimentación de corriente al circuito de armadura.

1.3 ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE VELOCIDAD DE UNA MÁQUINA DE C.D.

Una vez arrancado el motor se puede observar que la velocidad del mismo puede variar de acuerdo a las necesidades y aplicaciones al cual este sometido. En la mayoría de estas aplicaciones se requiere que su velocidad sea controlada. De ahí que existan variantes de control dependiendo del proceso y trabajo que desarrolle el motor.

Las distintas formas de control de velocidad; están basadas en la expresión general para el control de velocidad en motores de c.d.

$$n = K \frac{V_A - I_a R_a}{\phi}$$

En general la ecuación de velocidad puede definirse a partir de la ecuación del voltaje aplicado en las terminales de armadura. Ver fig. 6

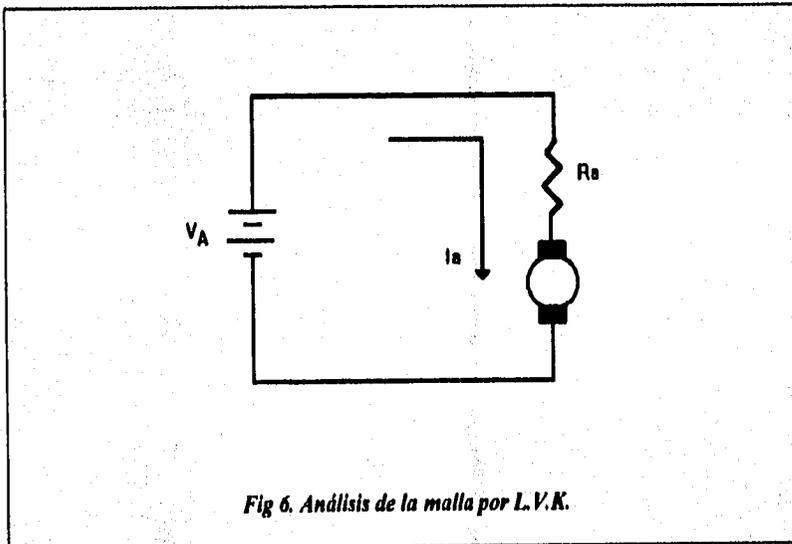


Fig 6. Análisis de la malla por L.V.K.

$$V_A = E + I_a R_a + \Delta V \text{ (Volts)}$$

Donde:

V_A = Voltaje aplicado en la armadura (volts)

E = Fuerza contraelectromotriz (volts)

I_a = Corriente de armadura (Amperes)

R_a = Resistencia de armadura (Ohms)

ΔV = Pérdidas en las escobillas (volts)

Si se considera las pérdidas de las escobillas despreciables, se deduce la siguiente ecuación.

$$V_A = E + I_a R_a \quad (\text{volts})$$

Despejando la fuerza contraelectromotriz de la ecuación anterior tenemos:

$$E = V_A - I_a R_a \quad (\text{volts}) \quad \dots (1)$$

Sin embargo, la fuerza contraelectromotriz en un motor se define como:

$$E = \frac{z p n \phi \times 10^{-8}}{a \times 60} \quad (\text{volts})$$

Donde:

E = Fuerza contraelectromotriz.

z = Número de conductores en la armadura.

p = Número de polos.

ϕ = Flujo por polo en líneas o maxwells.

a = Número de trayectorias paralelas en la armadura.

n = Velocidad en rpm.

Teniendo en consideración que z , p y a forman parte de la constitución de la máquina, podemos tomarlas como una constante k para obtener la siguiente ecuación.

$$E = k n \phi$$

Despejando la velocidad de la ecuación anterior se tiene:

$$n = \frac{E}{k \phi} = k \frac{E}{\phi} \quad (\text{rpm}) \dots (2)$$

Sustituyendo la fuerza contraelectromotriz (ec. 1) en la (ec. 2) de la velocidad tenemos:

$$n = k \frac{V_A - I_a R_a}{\phi} \quad (\text{rpm}) \dots (3)$$

CAPÍTULO 2

2.- CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DE C.D. DE ACUERDO

AL TIPO DE CONEXIÓN.

Los motores se clasifican de acuerdo a la forma de conectar a los devanados de campo y armadura, de ésta manera pueden ser conectados como:

- a) Conexión tipo paralelo
- b) Conexión tipo serie
- c) Conexión tipo compuesta

2.1 CONEXIÓN TIPO PARALELO.

El motor con conexión tipo paralelo (derivado o shunt) recibe éste nombre porque el devanado de campo es puesto en paralelo al devanado de armadura y conectados a su vez a una fuente de voltaje en paralelo.

En esta conexión existe una trayectoria de flujo de la corriente para cada devanado, es decir, una trayectoria para la corriente campo y una trayectoria para la corriente de armadura como se ilustra en la figura. 7

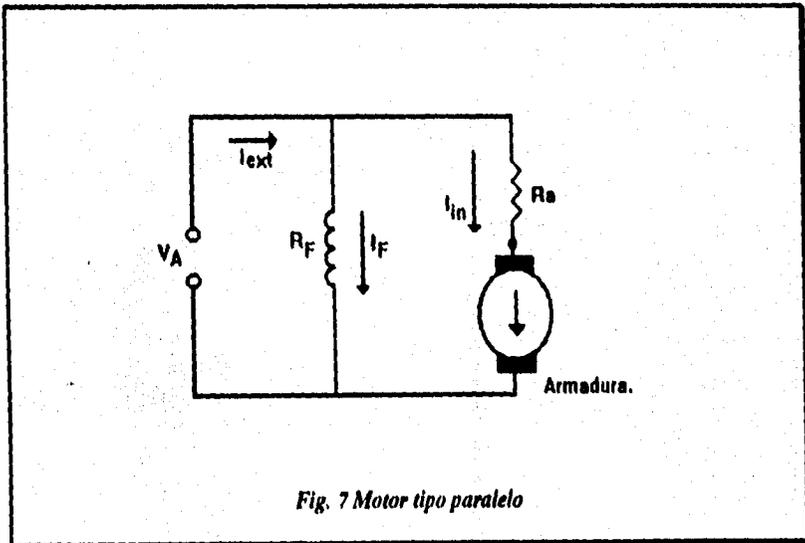


Fig. 7 Motor tipo paralelo

De esta forma, la corriente de excitación o alimentación (I_{ex}) es:

$$I_{ex} = I_a + I_F$$

Donde:

I_{ex} = Corriente de excitación o alimentación

I_a = Corriente de armadura

I_F = Corriente de campo

El flujo para el tipo paralelo esta en función de la corriente de excitación (I_{ex})

$$\phi = f(I_{ex})$$

La corriente de excitación se calcula mediante:

$$I_{ex} = V/R_F$$

Donde R_F es la resistencia de campo.

Cuando un motor en derivación arranca, el par desarrollado debe ser mayor que el par resistente de la carga para obtener un par de aceleración. Esto se puede notar considerando la ecuación de la fuerza contraelectromotriz $E = V_A - R_a I_a - \Delta V$. Considerando la ecuación en función de la (I_a)

$$I_a = \frac{V_A - E - \Delta V}{R_a}$$

Puede observarse que la fuerza contraelectromotriz (E) es inferior al voltaje aplicado en un pequeño porcentaje, cuando el motor gira con una carga.

La potencia de entrada al motor es:

$$P = V I$$

Potencia desarrollada = Potencia de entrada - Pérdidas en armadura - Campo

$$P_d = VI_{ex} - R_a I_a^2 - VI_f$$

$$P_d = V(I_{ex} - I_f) - R_a I_a^2$$

Donde:

$$I_a = I_{ex} - I_f$$

$$P_d = VI_a - R_a I_a^2$$

$$P_d = I_a (V - R_a I_a)$$

Donde:

$$E = (V - R_a I_a)$$

$$P_d = E \times I_a$$

Las ecuaciones fundamentales para el estudio de las características de los motores tipo paralelo son las siguientes.

La fuerza electromotriz esta dada por:

$$E = V_A - R_a I_a - \Delta V$$

El par desarrollado:

$$T = \frac{7.04 E I_a}{n}$$

La velocidad:

$$n = K \frac{V_A - I_a R_a}{\phi}$$

Observando la ecuación de par desarrollado por la armadura operando a una velocidad constante, podemos notar que es proporcional a la corriente I_a .

De aquí que la curva característica Par-Corriente de armadura para una conexión tipo paralelo sea una gráfica proporcional como se muestra en la figura 8.

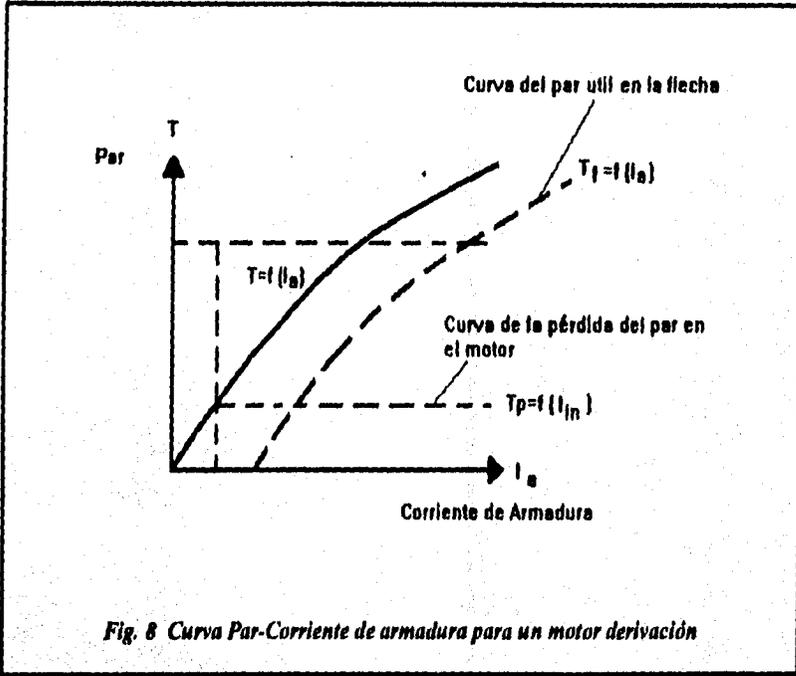


Fig. 8 Curva Par-Corriente de armadura para un motor derivación

Donde:

$T_f = f(I_a)$ es la curva útil

$T_p = f(I_a)$ es la curva de la pérdida del par en el motor.

Para el cálculo del par útil, se realiza restando el par desarrollado menos el par de pérdidas. $T_{UTIL} = T_D - T_{PERD}$. Si la velocidad es constante, el voltaje y el flujo dependen sólo de la corriente de armadura (I_a), al aumentar el par, aumenta también la corriente, por lo tanto aumenta la caída de tensión Rala y disminuye también la velocidad, pero como el valor de Rala es siempre pequeño, entonces la velocidad decrece poco al aumentar la carga.

Para la curva característica velocidad (n) - corriente de armadura (I_a) llamada también característica electromecánica de la velocidad, es de acuerdo con lo anterior, una recta casi horizontal, ver fig. 9 :

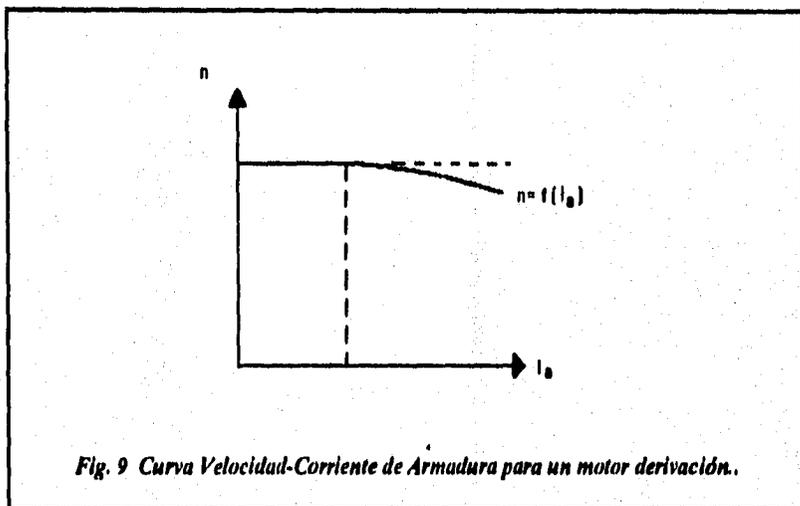


Fig. 9 Curva Velocidad-Corriente de Armadura para un motor derivación.

Considerando la curva característica par-velocidad también llamada curva característica mecánica para el motor en conexión tipo paralelo, se obtiene de una combinación de las curvas de par-corriente de armadura y velocidad contra corriente de armadura y se expresa como $T = f(n)$ y esta dada como la curva de la figura 10:

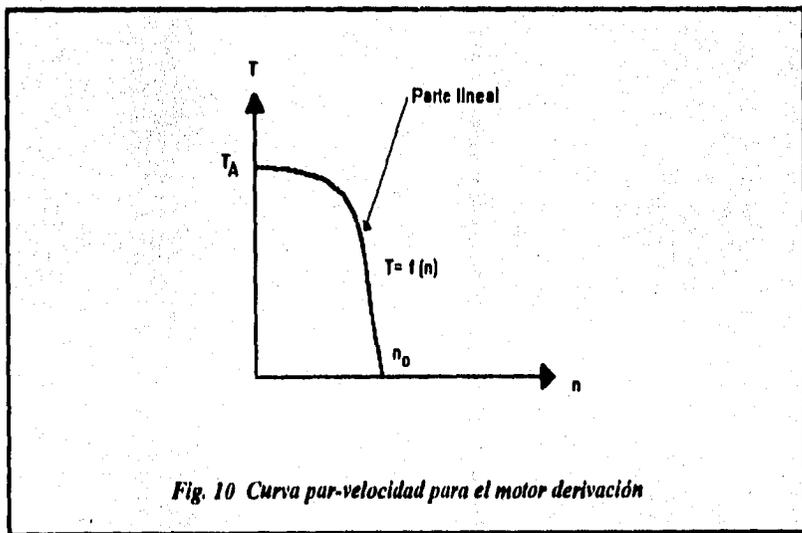


Fig. 10 Curva par-velocidad para el motor derivación

Analizando la curva anterior se puede notar que para valores bajos de velocidad, y por lo tanto para corrientes muy elevadas, la parte lineal de la curva se dirige hacia el eje par que corta al eje en el punto T_A , que representa el par máximo que se obtiene realizando el arranque del motor a plena tensión.

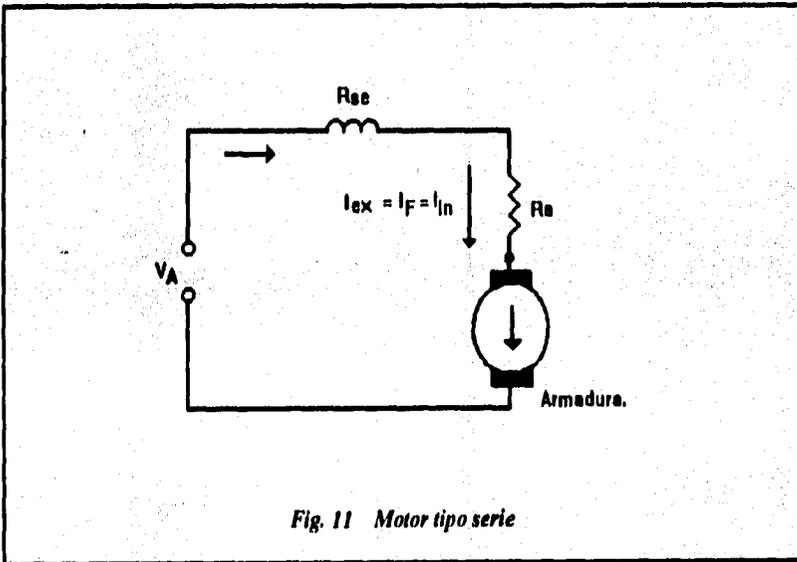
El campo normal de funcionamiento corresponde casi siempre a la parte lineal de la curva característica.

En esta parte la disminución de la velocidad de vacío a la velocidad de plena carga resulta prácticamente despreciable.

Por lo descrito, se tiene que, los motores de tipo derivación se usan en sistemas de tensión constante, donde se requiere de una velocidad prácticamente invariable y el motor puede mantenerse dentro de la región de operación estable, por ejemplo, bombas, ventiladores, máquinas de impresión, máquinas de papel, etc.

2.2 CONEXIÓN TIPO SERIE.

En una conexión tipo serie, el devanado de campo se encuentra conectado en serie con la armadura de manera que la corriente total es la misma en el devanado de campo y en la armadura. Por lo general el devanado de campo es de pocas espiras de sección transversal grande.



Las relaciones principales para el motor serie son las siguientes.

I_a = Corriente de armadura o inducido.

I_{se} = Es la corriente en el devanado de campo en serie.

I_{ex} = Es la corriente de excitación o alimentación.

Aquí se puede observar que la corriente de excitación es la misma, que la corriente de campo y la corriente de armadura. El flujo de excitación está en función de la corriente de armadura.

$$\phi = f(I_a)$$

La potencia de entrada al motor es.

$$P = V I$$

La potencia desarrollada

Potencia desarrollada = Potencia de entrada - Pérdidas en armadura y campo.

$$P_d = V I_{ex} - (R_a + R_{se}) I_a^2$$

Donde: $I_a = I_{ex} = I_f$

$$P_d = V I_a - I_a^2 (R_a + R_{se})$$

$$P_d = I_a (V_A - I_a (R_a + R_{se}))$$

Donde: $E = V_A - I_a (R_a + R_{se})$

$$P_d = E \times I_a$$

Las ecuaciones fundamentales para el estudio del motor tipo serie son las siguientes:

La fuerza contraelectromotriz desarrollada es:

$$E = V_A - I_a(R_a + R_{se}) \quad (\text{volts})$$

El par desarrollado es:

$$T = K \phi I_a$$

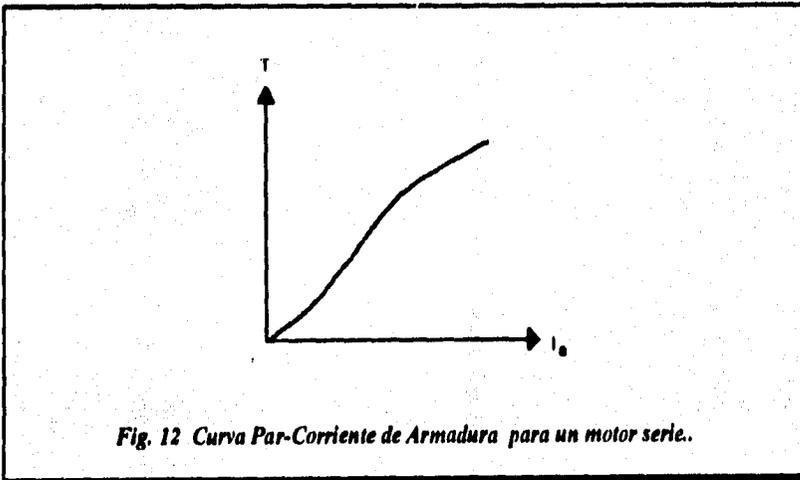
La velocidad:

$$n = k \frac{V_A - I_a(R_a + R_{se})}{\phi}$$

Como se sabe el flujo principal es producido por el circuito de campo que está conectado en serie con la armadura. Como el flujo es pequeño para corrientes pequeñas de inducido se tiene que la velocidad es mayor debido a que se tiene un par mayor. El par varía en proporción al cuadrado de la intensidad de corriente de inducido. Cuando la corriente adquiere valores que saturan el circuito magnético de la máquina, el par resulta ser simplemente proporcional a la corriente, debido a que el flujo permanece constante.

Curva característica par (T)-corriente de inducido (I_a).

En esta curva característica se nota la relación existente entre par y corriente de inducido. Ver fig. 12:



Curva característica velocidad (n)-corriente de armadura (I_a).

Como se ve en esta curva Fig. 13 .La velocidad esta en función de la (I_a) como el flujo crece proporcionalmente a la corriente; tenemos que:

$$n = k \frac{V_A - I_a (R_a + R_{se})}{\phi}$$

Considerando despreciable el término I_a (R_a + R_{se}) tenemos:

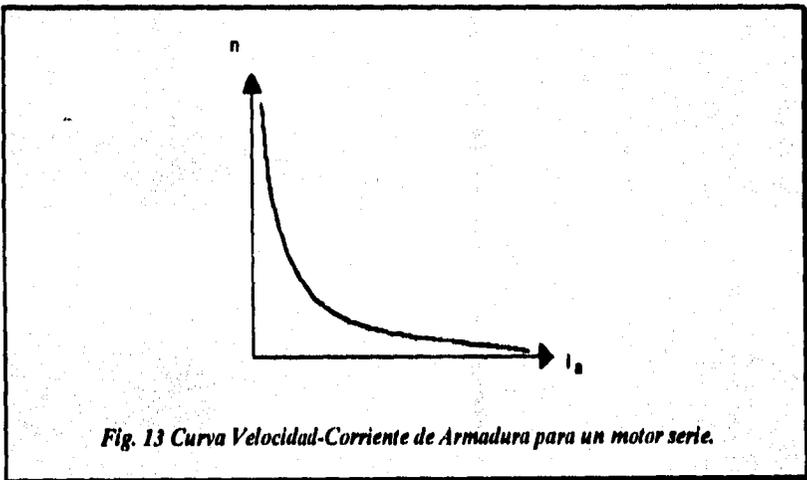
$$n = k \frac{V_A}{\phi}$$

Siendo esta expresión una curva hiperbólica como la mostrada en la figura 13, en donde la velocidad es inversamente proporcional a la corriente que demanda el motor.

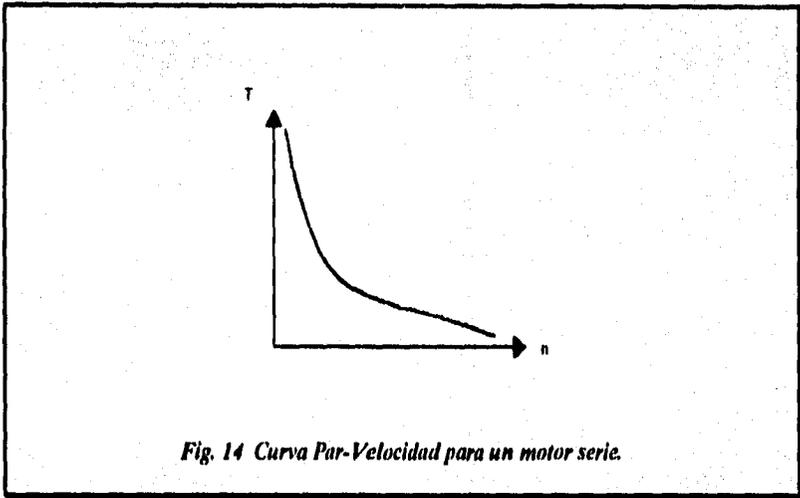
En cuanto el motor se arranca y acelera la corriente absorbida se va limitando debido a la acción de la fuerza contraelectromotriz en el inducido y que es gradualmente creciente.

El motor serie tiene la desventaja de que tiende a desbocarse con cargas bajas. La sobrevelocidad puede provocar la destrucción del motor si se le suprime la carga repentinamente. Ver fig. 13.

Por esta razón, un motor tipo serie solo debe usarse donde la carga está acoplada o conectada por engranaje al eje del motor.



De las características de estas curvas vistas anteriormente se puede obtener la curva velocidad (n) - par (T), también conocida como característica mecánica del motor, la curva resultante es: Ver fig. 14.



Por lo que se puede resaltar las siguientes características del motor en conexión serie.

A un aumento de par se puede obtener una velocidad menor y de manera inversa a cada aumento de velocidad se obtiene un par menor.

Por último el flujo es substancialmente proporcional a la corriente y esta a su vez inversamente proporcional a la velocidad.

Algunas aplicaciones se encuentran en: grúas montacargas, transportadores, puentes, trolebús, etc.

2.3 CONEXIÓN TIPO COMPUESTO.

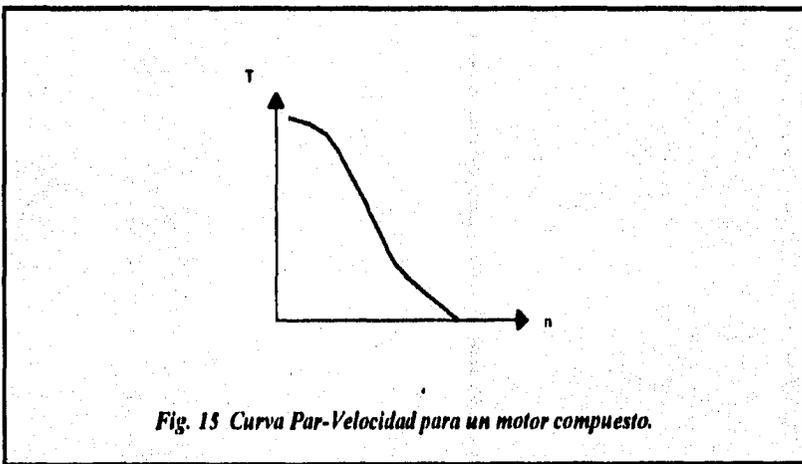
En el motor con conexión compuesta se mezclan las características que tienen los de conexión serie y derivado, la proporción entre los dos circuitos determinará si la característica del motor tiende más hacia la del tipo serie o hacia la del tipo derivación.

Si el motor serie se provee de un arrollamiento en derivación, se evita la posibilidad de sobrevelocidad en vacío. Si un motor derivación se provee de un arrollamiento serie, es posible obtener una velocidad casi independiente de la carga y por lo tanto casi constante.

♦ **MOTOR COMPUESTO ACUMULATIVO.**

El motor de corriente directa compound acumulativo presenta en parte la propiedad de los motores serie, esto es un considerable par de arranque y una disminución de velocidad al aumentar la carga, y por otra parte, la característica de los motores en conexión en derivación de tener una velocidad constante.

La característica mecánica de par contra velocidad corresponde a la fig. 15.



Cuando el motor compuesto tiene el devanado de campo en serie y el devanado de campo en derivación en la misma dirección y si los flujos se combinan para formar un campo más fuerte se dice que es un compuesto acumulativo.

El motor compuesto acumulativo desarrolla un par más alto con un incremento en la carga y también tiene un límite de velocidad en vacío, de manera que su velocidad no se excede cuando está en vacío. Los motores compound acumulativo se usan por lo general para el accionamiento de máquinas que están sujetas a la aplicación de cargas pesadas súbitamente, como por ejemplo los molinos, perforadoras, prensas, punzadores, etc.

♦ **MOTOR COMPUESTO DIFERENCIAL.**

El motor compuesto diferencial es esencialmente un motor en derivación con un devanado de campo en serie. En este motor, los devanados de campo están colocados en direcciones opuestas, de tal manera que la corriente en el devanado serie se resta de la que ya fluye en derivación, de ahí el nombre diferencial pues se restan los flujos y la diferencia de ellos es el resultante.

Al aumentar la carga, el flujo resultante disminuye lo que determina un aumento correspondiente a la velocidad, que está dada por la expresión:

$$n = k \frac{V_A - I_a R_a}{\phi}$$

De lo que se puede observar que al aumentar la corriente de carga I_a , disminuye por un lado el numerador por el aumento de la caída de voltaje y por otro lado disminuye $C\phi$ por efecto de la excitación en sentido opuesto debido al devanado de campo en serie. La característica mecánica (par-velocidad) tiene la forma de una recta casi normal al eje y. Fig. 16

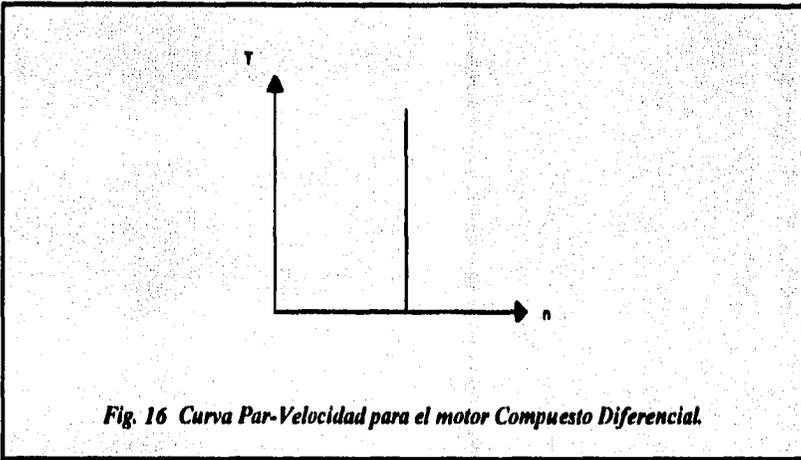


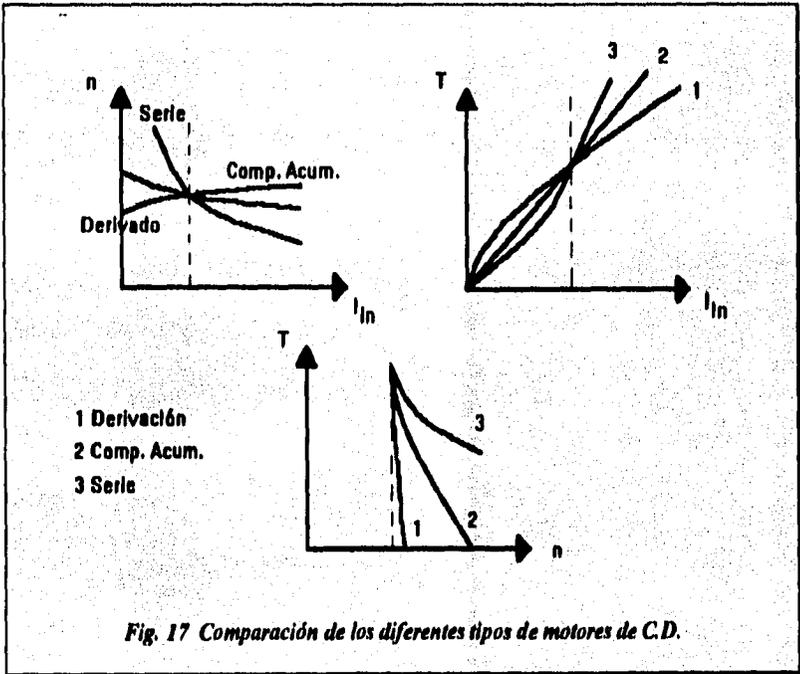
Fig. 16 Curva Par-Velocidad para el motor Compuesto Diferencial.

Debido a que el campo en serie está dominado por el campo en derivación, el motor compuesto diferencial no tiene las mismas características de par de arranque que el motor serie típico. En este caso, el campo en serie sirve más bien para que el motor sea más sensible al cambio de carga, de manera que proporcione una mejor regulación de velocidad constante que el motor en derivación normal.

Existe una mejor regulación de velocidad constante debido a que, cuando un aumento de carga hace que el motor funcione lentamente, además del normal en el cual la disminución de la f.c.e.m. hace circular mayor corriente, también ocurre un aumento en la corriente de los devanados de campo en serie. Este aumento de corriente en el devanado se opone a la que fluye en el devanado de campo en derivación y, en consecuencia lo reduce. Concluyendo, se dice que el motor compuesto diferencial es más bien un regulador sensible de velocidad constante, por lo que sus aplicaciones se ven reducidas.

Resumen de las curvas de los diferentes tipos de motor.

Las gráficas siguientes muestran una síntesis de las características de curvas de los motores de C.D. Fig. 17.



CAPÍTULO 3

3.- MÉTODOS GENERALES DE CONTROL DE VELOCIDAD.

En general el control de velocidad de los motores de corriente directa puede ser por control en el devanado de campo y control por armadura.

3.1 CONTROL POR CAMPO

Básicamente existen dos métodos de control de campo en los motores de C.D. en una conexión Shunt.

a) Control de voltaje de campo. El control de velocidad por este método requiere de una fuente de alimentación de voltaje variable para el devanado de campo, que se aísla o separa de la fuente de alimentación principal a la cual se conecta la armadura. La fuente de alimentación de voltaje variable se puede obtener por medio de un rectificador electrónico que toma su alimentación de una red de corriente alterna. Ver fig. 18

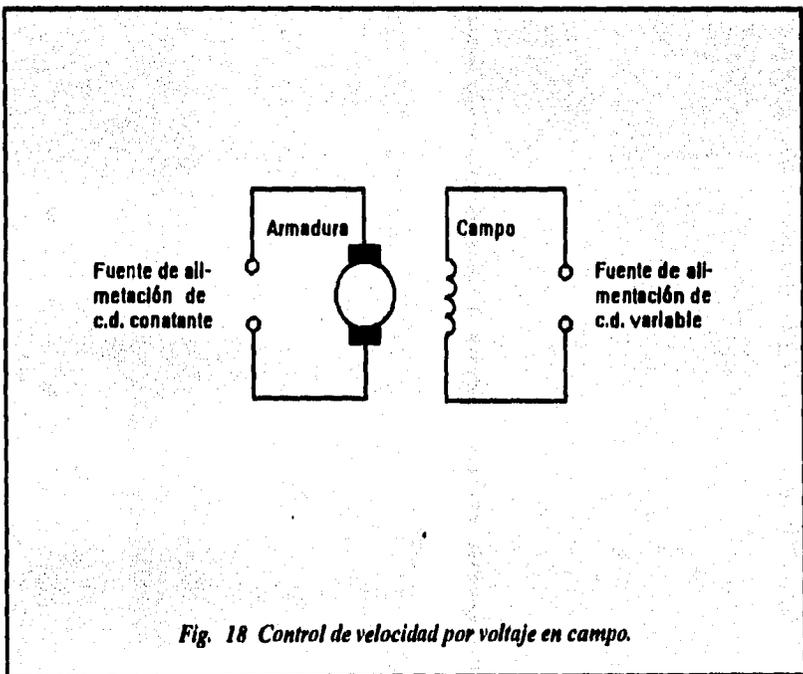


Fig. 18 Control de velocidad por voltaje en campo.

b) Control por reostato de campo. Este método se basa en la variación del flujo por medio de la variación de la corriente de campo en un reostato de campo conectado en serie con el devanado de campo. Ver fig. 19

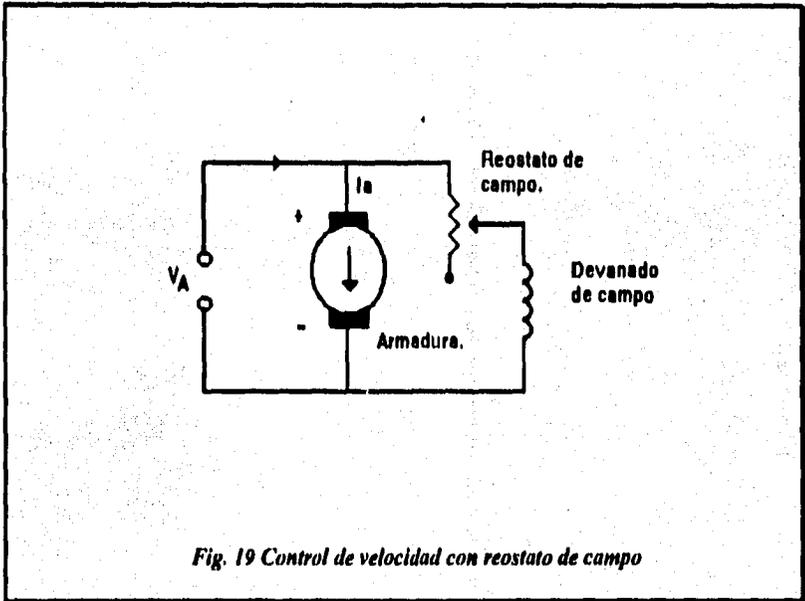


Fig. 19 Control de velocidad con reostato de campo

- **CARACTERÍSTICAS**

Económico y sencillo de implementar.

Dentro de ciertos límites no afecta la regulación del motor.

Las pérdidas del circuito de excitación son apenas de 3 al 5% de la potencia absorbida por el motor

La variación de la velocidad se logra a partir de la básica ó nominal hacia arriba.

Si el flujo desciende demasiado la velocidad crece indefinidamente.

Debido a que puede incrementarse su velocidad en vacío, este tipo de motor se arranca a pleno campo.

Controla un rango de velocidad desde la nominal hasta un 50% más.

Cuando se aplica un voltaje o tensión nominal en la armadura. El flujo de campo puede variar tanto manual ó automáticamente por medio de un reostato en serie, se puede apreciar que cuando el motor se pone en marcha, el reostato de campo puede no estar limitando el flujo, de ser así éste se encontrará trabajando a una velocidad nominal o básica.

Por otro lado si el reostato de campo se encuentra dentro de un rango del mismo; el motor tendera a girar o a incrementar su velocidad; ya que el reostato limitará la corriente en el devanado de campo y está circulara por la armadura; es por esto que su rango de control de velocidad se encuentra de la básica a un 50% más. Si por alguna razón el devanado de campo se llegara a perder la velocidad se incrementaría de manera indefinida.

En general el control por campo es un método que permite velocidades por encima de la básica y presenta algunas ventajas sobre los otros métodos de control, ya que es relativamente económico y sencillo de implementar, dentro de ciertos límites, el control por campo no afecta la regulación de la velocidad del motor; ya que si llega a existir un debilitamiento considerable de campo, la velocidad del motor tendería a incrementarse demasiado afectando la regulación del motor y provocando una velocidad mayor. Razón por la cual se arranca a pleno campo.

3.2 CONTROL POR ARMADURA.

El control de velocidad de los motores en derivación por medio del control de armadura, se requiere que el voltaje aplicado a las terminales de armadura se pueda modificar, sin cambiar la corriente de campo. Básicamente existen dos métodos de control por armadura.

a) Control por resistencia en la armadura. Este Método consiste en conectar una resistencia en serie con la armadura, esta resistencia es variable, con lo cual se puede obtener un amplio rango de variación de velocidad, siendo esta variación directamente proporcional a la caída de voltaje.

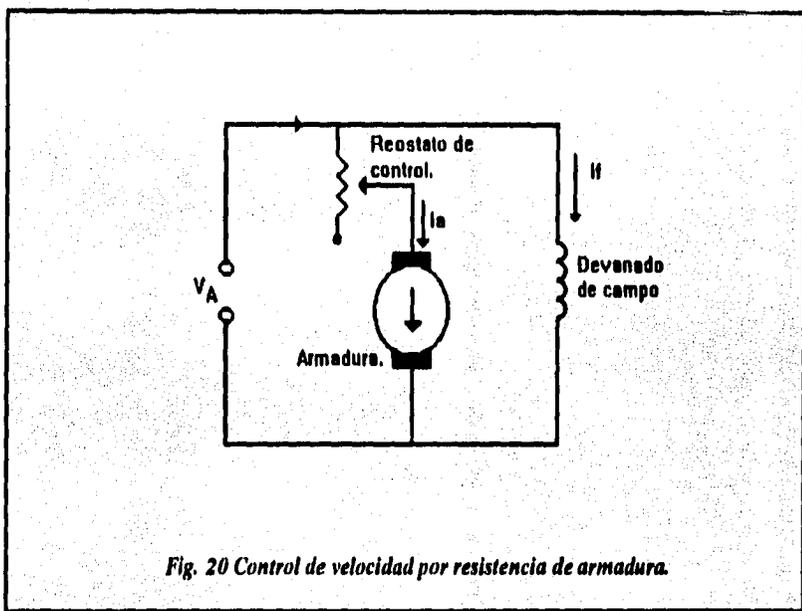


Fig. 20 Control de velocidad por resistencia de armadura.

- **CARACTERÍSTICAS.**

Velocidades por debajo de la básica.

Fácil de implementar.

Combina arranque con control de velocidad.

No existe riesgo de que la velocidad se incremente.

Pobre regulación de velocidad para un ajuste determinado.

Pérdidas por efecto joule en la resistencia.

Costo elevado de la resistencia.

Este tipo de control es muy empleado en ventiladores y sopladores donde la carga cae rápidamente con reducción de velocidad.

Cuando el reostato de campo se ajusta de manera que no haya limitación en la corriente de armadura. El motor gira a su velocidad nominal o básica; de manera que cuando el reostato se va ajustando a su valor máximo, la velocidad decrece proporcionalmente. Por esta razón se dice que el control por resistencia en inducido puede lograr velocidades por de bajo de la básica y ser sencillo de implementar; de ahí que combine arranque con control de velocidad. Dada la situación que el campo recibe un flujo constante y no halla riesgo que se pierda; en este tipo de control no existe la posibilidad de que la velocidad pueda incrementarse; ya que la resistencia en serie limita la corriente en la armadura.

Como la corriente esta en función de la carga, para un valor determinado de la resistencia en serie; un aumento de carga provocará una disminución en la velocidad y por consecuencia una pobre regulación de velocidad; De alguna manera como la resistencia es la que limita la corriente ésta es de gran tamaño provocando gran disipación de corriente y costo elevado.

La combinación del control de la resistencia de inducido y de campo de un motor paralelo mostrada en la figura 21, proporciona un medio razonable, eficaz y relativamente barato de obtener velocidades por encima y por debajo de la básica en el caso de motores de c.d. pequeños. En los de potencias nominales grandes, cuando se deseen obtener muy bajas velocidades y un control en marcha lenta o arrancadas frecuentes; se precisa una resistencia bastante grande en el circuito de inducido, de valor nominal relativamente elevado. Dicho tipo de resistencia da lugar a un funcionamiento de bajo rendimiento y es relativamente cara. Esta dificultad se salva mediante el control de la resistencia de inducido en serie y paralelo. (Control con derivador en la armadura).

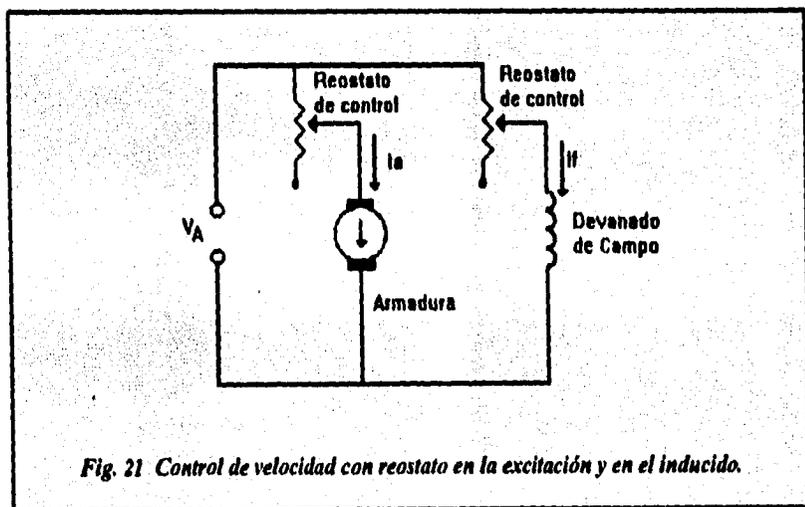


Fig. 21 Control de velocidad con reostato en la excitación y en el inducido.

b) Control con derivador en la armadura. Este método consiste en agregar un reostato en paralelo o derivador con la armadura; además de la resistencia en serie con la armadura. Este método tiene como finalidad obtener un control de velocidad más estable; es decir: En un control de velocidad por armadura, la velocidad cambia con cualquier cambio en la carga; debido a que en este tipo de control la variación en la velocidad no depende sólo del cambio de resistencia de control de armadura, sino también en el cambio en la corriente de carga.

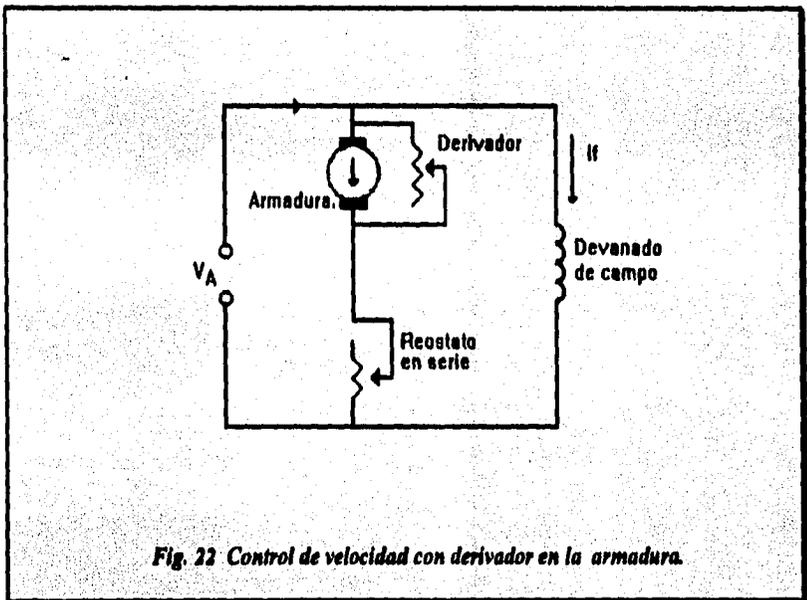


Fig. 22 Control de velocidad con derivador en la armadura.

- **CARACTERÍSTICAS.**

Regulación de velocidad superior a la que se logra por resistencia de inducido.

La resistencia de inducido en paralelo puede tener otros usos. (Para un control de frenado dinámico).

No hay riesgo de que el flujo tienda a cero.

El par es reducido aumentando la desviación de corriente de inducido.

Pérdidas por efecto joule.

Resistencia costosa y de gran volumen.

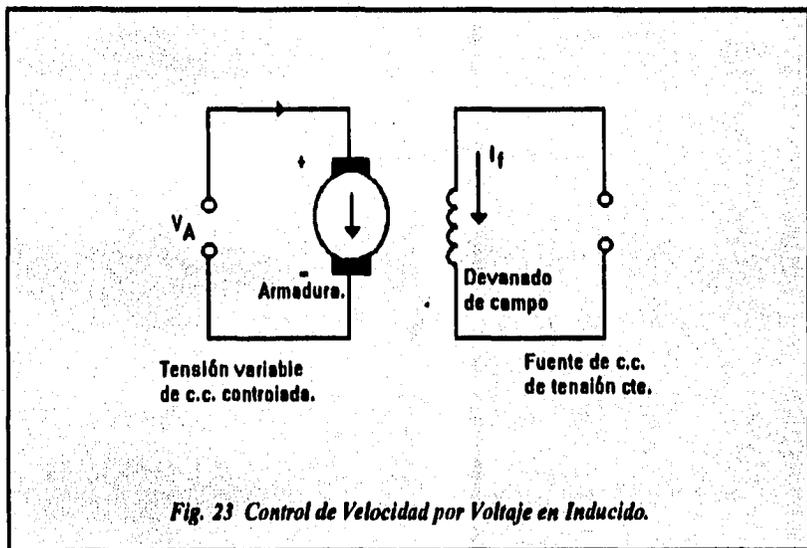
La resistencia variable en paralelo actúa como un desviador de corriente de armadura; la cual tiende a reducir al decrecer la resistencia. La resistencia en serie actúa de la misma manera que el control por resistencia en inducido, es decir limita el voltaje aplicado en la armadura.

Considerando que el flujo en el devanado de campo es constante y que a una determinada carga existe un aumento en la resistencia en serie, se producirá una disminución en el voltaje aplicado y por consecuencia una disminución de velocidad. Por otro lado si existe un aumento de la resistencia en paralelo también se producirá una disminución de velocidad ya que habrá una caída de tensión mayor ($I_a R_a$).

De lo anterior se puede definir que con una disminución en cualquiera de las resistencias existirá una velocidad superior y con mayor regulación que la que se puede lograr por resistencia en armadura. Una aplicación importante para la resistencia en paralelo es cuando se requiere de un frenado dinámico. Dada la forma en que se encuentra conectado el campo no es posible que exista una sobrevelocidad al menos que se pierda o abriese el campo. Puede existir la posibilidad de reducir el par desviando la corriente en la armadura. Por poseer resistencias que limitan la corriente, estas son de gran volumen, disipan pérdidas por efecto Joule y son costosas.

3.3 CONTROL POR VOLTAJE EN ARMADURA.

Este método de control de velocidad requiere de una fuente de voltaje variable que está separada de la fuente que alimenta la corriente de campo. El método en si es más eficiente que los descritos antes por control de armadura, y la razón es que elimina el problema de obtener una pobre regulación de velocidad y una pobre eficiencia, sin embargo tiene la desventaja de que su costo inicial es mayor, la fuente de voltaje variable puede ser un generador de c.d. o bien un rectificador de estado sólido, permite obtener un amplio rango de variación de velocidad con cualquier valor de voltaje.



Si la tensión del inducido que se suministra de la fuente de alimentación variable de c.d. es cero. El motor desarrolla un par nulo $T = k \phi I_a$, y queda en reposo. Si la tensión de inducido se incrementa ligeramente, de acuerdo con la ecuación fundamental de la velocidad:

$$n = k \frac{V_A - I_a R_a}{\phi}$$

el motor se pone en marcha y gira a una velocidad lenta con un mínimo de aceleración. La corriente de inducido queda limitada debido a la baja tensión en bordes de inducido.

Para motores de c.d fraccionarios y de valor nominal de potencia relativamente baja, la fuente variable de tensión de c.d. puede ser un rectificador de semiconductores, alimentado por una fuente de c.a. trifásica o monofásica.

• **CARACTERÍSTICAS.**

No requiere de arrancador.

Se logran velocidades desde cero hasta la nominal.

La aceleración es suave.

Invertiendo la polaridad de la fuente, se invierte el sentido de giro.

Es ideal para motores pequeños.

No logra velocidades por encima de la nominal o básica.

En este tipo de control existe la posibilidad de lograr una amplia gama de velocidades desde el reposo hasta la nominal, lo cual no requiere de arrancador. Si existe la posibilidad de invertir la polaridad de la fuente, se puede lograr una inversión de giro. En este tipo de control es posible la adaptación de rectificadores el cual lo hace ideal para el uso de motores pequeños.

CONCLUSIONES.

En realidad la importancia de los motores eléctricos de c.d. se ha incrementado en los años recientes, a pesar de la aparente sustitución de algunas de sus aplicaciones por los motores de c.a.

La mayoría de las aplicaciones de las máquinas eléctricas, corresponden a las llamadas máquinas de corriente alterna, por lo que en realidad se puede decir que pocas personas están familiarizadas con los motores de corriente directa o por lo menos se piensa que los motores de c.d. son poco importantes; esto se ha acentuado más aún, por el hecho de que algunas de las aplicaciones típicas de los motores de c.d. en procesos donde se requiere velocidad variable, han sido sustituidas por motores de corriente alterna con controles de velocidad más o menos sofisticados a base de dispositivos electrónicos, es decir aplicaciones al control de la llamada electrónica de potencia.

Algunas de las aplicaciones más comunes de los motores de c.d. se encuentran en aspectos de la vida común, por ejemplo el motor de arranque o "marcha" de los automóviles. En los transportes subterráneos urbanos como el metro y algunos ferrocarriles eléctricos rápidos.

A futuro, el desarrollo del automóvil eléctrico requerirá probablemente del uso de motores eléctricos de tracción con fuentes de alimentación de corriente continua desarrolladas en distinta forma.

Se puede observar de esta parte, que los motores de c.d. tienen un buen rango de aplicaciones, razón por la que técnicos e ingenieros deben tener un buen conocimiento de este tema.

ESTA TESTIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

BIBLIOGRAFÍA.

- ◆ CONTROL DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
I. L. KOSOW.
ED. REVERTÉ, S.A.
- ◆ CURSO DE MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA.
GILBERTO ENRÍQUEZ HARPER.
ED. LIMUSA.
- ◆ BIBLIOTECA PRÁCTICA DE MOTORES ELÉCTRICOS.
ROBERT J. LAWRIE. VOL. 1-2.
ED. OCÉANO / CENTRUM.
- ◆ REPARACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS.
ROBERT ROSENBERG
ED. G. GILL, S.A.
- ◆ MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
STEPHEN S. CHAPMAN.
ED. Mc GRAW HILL.
- ◆ CONTROL DE MOTORES ELÉCTRICOS.
WALTER N. ALERICH.
ED. DIANA.