

126
2ij



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTILAN**

**DISEÑO, PUESTA EN MARCHA, CONTROL Y
MANTENIMIENTO DE MOTORES DE CORRIENTE
DIRECTA.**

**CONTROL AUTOMATICO DE VELOCIDAD DE UN
MOTOR DE C.D. POR TENSION DE INDUCIDO**

TRABAJO DE SEMINARIO

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

RICARDO TELLEZ GUTIERREZ

ASESOR: ING. SABAS FLORES ASCENCIO

CUAUTILAN, IZCALLI, EDO. DE MEXICO

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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
AVENIDA DE
MEXICO

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 CEBALLO.
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES-C.

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

Diseño, Puesta en Marcha, Control y Mantenimiento de
Motores de Corriente Directa, Control Automático de
Velocidad de un Motor de Corriente Directa por Tensión
de Inducido.

que presenta el pasante: Tellez Gutiérrez Ricardo
con número de cuenta: 8437585-4 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"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, a 7 de Marzo de 19 96

MODULO:	PROFESOR:	FIRMA:
<u>1</u>	<u>Ing. Esteban Corona Escamilla</u>	
<u>3</u>	<u>Ing. Sabás Flores Ascencio</u>	
<u>4</u>	<u>Ing. Victor Hugo Landa Orozco</u>	

DEP/VOBOSEM

AGRADECIMIENTOS

- A mis padres :** *Por todo el amor, cariño, ternura y apoyo que me ofrecieron incondicionalmente, durante mi formación profesional, y aun más siempre.*
- A mi esposa :** *Porque con tu carácter, también me has formado, porque eres lista y muy profesional, porque te amo, te admiro y siempre tomare de ti un modelo a seguir.*
- A mis hermanas :** *Porque se que no ha sido fácil convivir con alguien como yo y que en su momento también padecieron mi mal carácter, pero a pesar de ello siempre recibí su apoyo .*
- A mis amigos :** *Porque incontables, todos dejaron algo o un mucho de bueno en mí, que espero siempre aprovechar al máximo y tenerlo presente en mi vida.*
- A mis maestros :** *Por que en cada palabra, expresión y acierto, esta uno y cada uno de mis profesores, y esto no es sino la muestra de lo que dejaron en mí.*

ÍNDICE

PÁGINA #

INTRODUCCIÓN

1

CAPITULO I. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN, CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE MOTORES DE C.D.

- 1.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LOS MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA 3
- 1.2 PARTES CARACTERÍSTICAS DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA 6
- 1.3 CLASIFICACIÓN GENERAL DE MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA 7

CAPÍTULO II ECUACIÓN DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA Y CARACTERÍSTICAS DE LA CONEXIÓN SERIE Y DERIVACIÓN

- 2.1 ECUACIÓN BÁSICA DE VELOCIDAD 11
- 2.2 CARACTERÍSTICAS PAR, VELOCIDAD DE LA CONEXIÓN SERIE Y DERIVACIÓN EN UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA. 13

CAPÍTULO III MÉTODOS DE VARIACIÓN DE VELOCIDAD PARA UN MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA.

- 3.1 MODIFICACIÓN DEL FLUJO DE EXCITACIÓN. 17
- 3.2 CONTROL POR LA RESISTENCIA DEL INDUCIDO. 18
- 3.3 CONTROL DE LA TENSIÓN DEL INDUCIDO 19

CAPÍTULO IV CONTROL AUTOMÁTICO DE VELOCIDAD

- 4.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE CONTROL PARA MÁQUINAS DE C.D. 22
- 4.2 PRINCIPIO DEL CONTROL AUTOMÁTICO ELECTRÓNICO 26

APÉNDICE 29

CONCLUSIONES 32

BIBLIOGRAFIA 33

CONTROL AUTOMÁTICO DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DE C.D POR TENSION DE INDUCIDO.

INTRODUCCIÓN.

En la actualidad, los motores de corriente continua son esenciales para el uso industrial, cuando se trata de mejorar la eficiencia en un proceso, tener un excelente control de velocidad, arranque e inercia estables en operación.

Los usos típicos de los motores de corriente continua tienen lugar con más frecuencia cuando se requiere:

1. Amplia variación de velocidad, ajustando esa variación de manera escalonada.
2. Un par de salida ya sea constante o variable, o su combinación, como lo exigen la mayor parte de los procesos.
3. Aceleración, desaceleración o inversión de rotación rápidas, como en el caso de grúas, tracción, propulsión, rolado de metales y otros procesos.
4. Precisión fina en el control de velocidad, como por ejemplo carretes de devanado, de papel, molinos de hule, etc.
5. Mantener una correlación precisa entre dos o más partes de una línea de procesamiento.
6. Los requerimientos de alto par de sobrecarga en la parte inferior del proceso con amplia variación de velocidad.
7. Un par de frenado regenerativo variable.

El motor de corriente continua es una máquina eléctrica que transforma la energía eléctrica en energía mecánica rotatoria y por sus características constitutivas y constructivas es ideal para el control de velocidad a través de una alimentación de corriente directa regulada en su inducido, por no requerir elementos de mando de fuerza complicados como arrancadores y disyuntores, logrando velocidades desde cero hasta la nominal, su aceleración es suave y puede lograrse una inversión de giro del motor con suma facilidad.

Por lo anterior se requiere una coordinación más estrecha entre la fuente de potencia, el diseño del motor y las características de carga en el uso de motores de corriente continua, que en el uso de motores de corriente alterna. Esta coordinación requiere un conocimiento concienzudo de las características del motor de corriente continua para lograr un sistema motriz óptimo.

Puesto que en la actualidad se tiene muy poco uso de sistemas de distribución de potencia de corriente continua, cada motor de c.c. tiene normalmente su propia fuente de potencia en la forma del juego del motor-generador de ca-cc o alguno de los diversos tipos disponibles de rectificadores estáticos. Todos estos sistemas permiten el control estable de velocidad de un motor de c.c. en el ámbito total en que varía su velocidad, por medio de variación de voltaje de armadura aplicado mientras se mantiene constante el campo del motor. Este tiene una capacidad constante de potencia de revoluciones por segundo (par y corriente de armadura constante) cuando se usa este medio para ajustar la velocidad, el tipo de ventilación proporcionado determinará la duración del par disponible.

En la actualidad es de mayor uso la energía rectificada estáticamente de ca-cc debido a la alta eficiencia, economía y eliminación de cojines, escobillas y conmutador, así como elementos adicionales externos al motor de C.D., dando como resultado una significativa simplificación en su mantenimiento y operación.

Sin embargo, tanto el motor de cc como la fuente de potencia deben acoplarse con cuidado. Pueden sobrevenir problemas de conmutación y sobrecalentamiento en el motor a bajas velocidades si no se usa un número eficiente de fases y la salida del rectificador puede llegar a ser demasiado pulsante. Además sin olvidar el problema de sincronización que implica la alimentación al inducido a través de una fuente rectificada con diodos y SCR's.

CAPÍTULO

I

*PRINCIPIOS DE OPERACIÓN,
CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE
MOTORES DE C.D*

1.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LOS MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

Suponiendo que se dispone de un imán donde el polo norte y el polo sur forman un campo magnético dentro del cual se tiene un conductor y existe una variación o un movimiento se creará una Fuerza Electromotriz (F.E.M.).

$$E = \beta l v \times 10^{-8} \text{ Volts (1)}$$

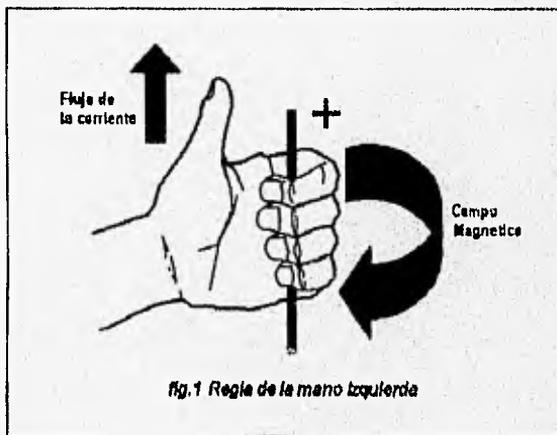
donde: E = Fuerza Electromotriz (FEM inducida).

β = Densidad de campo.

l = Longitud del conductor

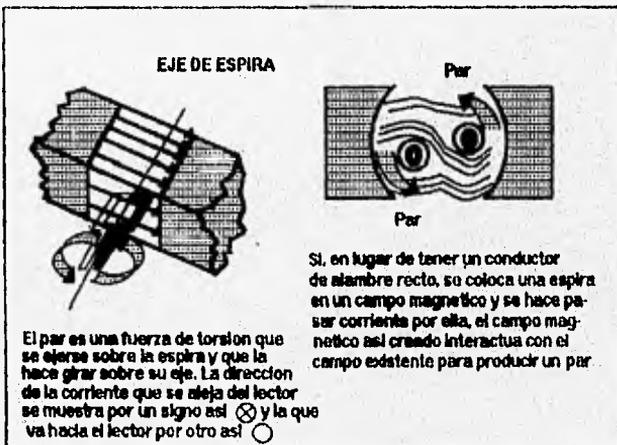
v = Velocidad con la cual se mueve el conductor.

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 (fig. 1) y regla de la mano derecha (fig. 2).





En la *fig. 3a* se observa que el conductor tiene un movimiento lineal y deja de efectuarse al salirse del campo magnético, esto es impráctico ya que para una máquina debe existir un movimiento giratorio, para esto es necesario tener una fuerza de torsión llamada par. Si el conductor se doblara de tal manera que formara una espira, entonces tendríamos la *fig. 3b*.



Al ser alimentada por una fuente de voltaje, la corriente fluye en un sentido en una parte de la espira y en otro sentido en la otra parte, provocando fuerzas en sentido contrario por lo que la resultante es un par que hace que la espira gire perpendicularmente a las líneas de flujo.

La fuerza que produce el par de giro se obtiene de:

$$F = \beta l \cos \theta$$

Donde:

F= Fuerza (Newtons)

β = Densidad de flujo magnético (Weber/m²)

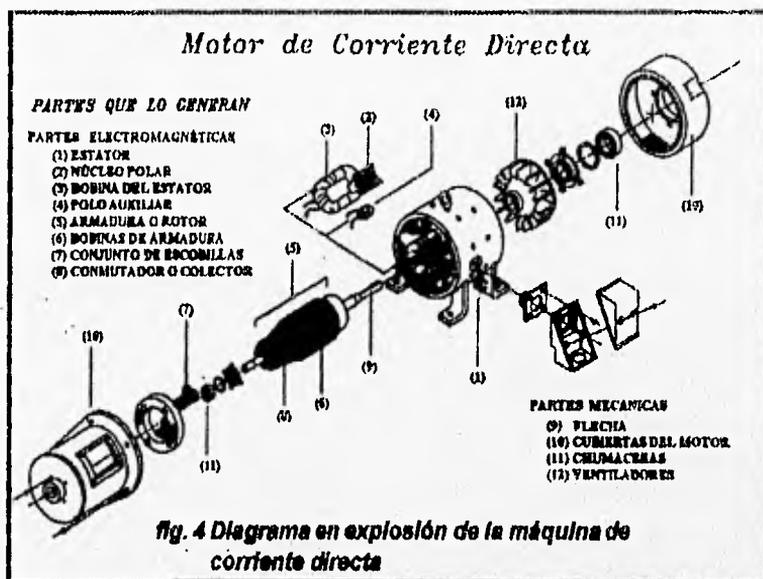
l = Longitud de un lado de la espira

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

Es decir, 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, aplicadas a un cuerpo, el cual tiende a girar alrededor de un eje perpendicular al plano del par.

1.2 PARTES CARACTERÍSTICAS DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA.

Los órganos principales de un motor de corriente continua son el inducido, los polos inductores con la carcasa, los escudos y el puente portaescobillas como se muestra en la fig. 4



a) Inducido o armadura. Es el órgano giratorio del motor, está formado por un núcleo de chapas magnéticas provisto de ranuras longitudinales para alojar las bobinas del arrollamiento.

El núcleo de chapas y el colector van clavados a presión en el eje del motor, sobre el colector frotan las bobinas del arrollamiento.

b) Carcasa. Construida de acero o de fundición de hierro, es generalmente circular y está mecanizada de modo que permita el montaje de los polos inductores en su interior.

c) Bobinas inductoras. Alrededor de cada polo van dispuestas las bobinas inductoras o de excitación, formadas por espiras de hilo aislado; dichas bobinas se excitan exteriormente antes de ser montadas.

d) Escudos. Generalmente son dos escudos, que van sujetos a la carcasa por medio de pernos, soportan el peso del inducido y lo mantienen equidistante de las piezas polares, los escudos llevan montados los cojinetes dentro de los cuales gira el eje del inducido, dichos cojinetes pueden ser de resbalamiento o bien de bolas.

e) Portaescobillas. El arrollamiento inducido de todos los motores de corriente continua se alimenta por medio de las escobillas. Esto se consigue conectando las diversas bobinas de dicho arrollamiento a las delgas del colector y aplicando a la superficie de éste sendas escobillas de carbón, que le transmiten la corriente mientras el inducido gira. Las escobillas van alojadas en el portaescobillas, las cuales están a su vez generalmente montados sobre el puente sujeto al escudo frontal. Dicho puente está construido de tal manera que permitan variar la posición de los portaescobillas. Los motores pequeños suelen carecer de puente y los portaescobillas son parte integrante del propio escudo.

1.3 CLASIFICACIÓN GENERAL DE MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

Antecedentes.

En la actualidad existen discrepancias en los criterios para clasificar los motores de corriente continua, ya que depende principalmente de la construcción y características del mismo. En éste capítulo mencionaremos cuatro criterios que son: a) tipo de aislamiento, b) tamaño físico o potencia determinada, c) tipo de excitación a la que son sometidos y d) tipo de conexión implementada en el mismo.

a) Tamaño físico.

Se dividen en fraccionarios, integrales y grandes motores industriales, mostrados en la *tabla 1.*

	<u>Alimentación</u>	<u>Rangos de potencia de operación</u>	<u>Velocidad base (rpm)</u>
Motores fraccionarios	120 VDC	1/20, 1/12, 1/8, 1/6, 1/4, 1/3, 1/2, 3/4, 1 HP	3450, 1750, 1140, 850
Motores integrales	120 y 240 VDC 250, 500 y 700 VDC	1/2, 3/4, 1, 1 1/2, 2, 3, 5, 7 1/2, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 125, 150, 200 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800	3500, 2500, 1750, 850, 650, 500, 400, 300
Motores industriales	250, 500 y 700 VDC	900, 1000	1110, 985, 950, 870, 830, 775, 710, 675, 640, 590, 540, 490, 460, 435

b) Tipo de aislamiento.

Se dispone de cuatro tipos de aislamiento, para niveles gradualmente crecientes de elevación de temperatura, con el objeto de conseguir tamaños de armazón para un determinado par motor nominal. Estos sistemas son las clases A, B, F y H y sus elevaciones de temperatura se muestran en la *Tabla 2*.

Clase	Temperatura en $^{\circ}C$
tipo A	$70^{\circ}C$
tipo B	$100^{\circ}C$
tipo C	$130^{\circ}C$
tipo D	$155^{\circ}C$

c) Tipo de excitación

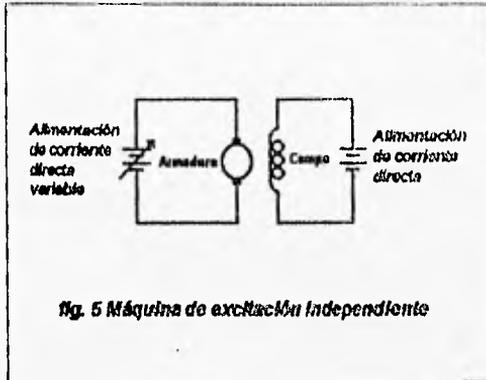
El campo magnético en las máquinas de corriente directa es producido por el inductor, el cual está constituido por un circuito magnético con polos de material magnético, sobre los cuales se insertan las bobinas de campo, por cuyos conductores circula corriente continua, a éstas corrientes se les conoce como "corriente de excitación" y según sea la forma como ésta corriente se obtenga, se tienen las distintas formas de conexión.

De acuerdo a las formas de excitación las máquinas de corriente directa, ya sea que funcionen como motor generador, se pueden clasificar como:

Máquinas con excitación independiente:

Ya que los devanados de campo como de inducido necesitan excitarse para que exista un par, ésta alimentación puede darse en forma separada:

- 1.- Si se tienen imanes permanentes para el campo, la armadura puede excitarse con una fuente externa.
- 2.- Si no existen imanes permanentes, entonces tanto el devanado de campo como el de armadura pueden excitarse en forma separada *fig. 5*.



Máquinas autoexcitadas:

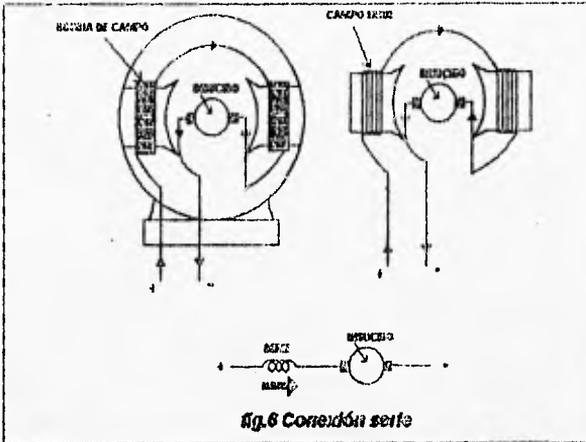
Se dice que son autoexcitadas cuando la corriente de excitación está constituida toda o en parte por la corriente de la máquina. Cuando éstas máquinas se ponen a operar por primera vez, deben ser excitadas en forma independiente. Después cuando se tiene un magnetismo residual que se refuerza con la corriente de la máquina, se tiene ya el sistema de autoexcitación. Concluyendo, de acuerdo con el tipo de conexión del arrollamiento de excitación respecto al arrollamiento del inducido y la carga, se obtienen tres casos distintos de autoexcitación:

- a) Excitación Serie
- b) Excitación Derivación
- c) Excitación Compuesta

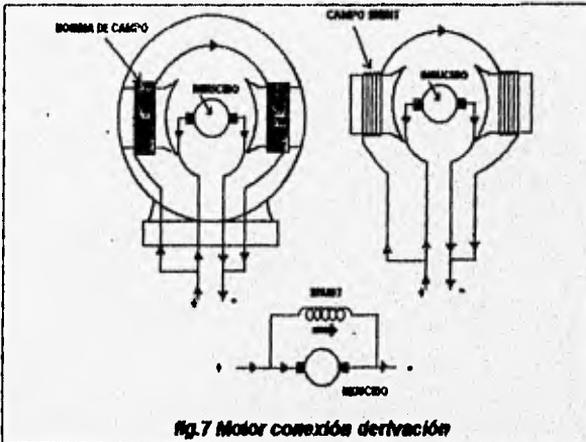
d) Tipo de conexión

Para nuestro estudio, tenemos dos tipos de conexión de motores de corriente continua: la conexión serie y derivación; los dos son de aspecto exterior semejante y sólo difieren entre sí por la construcción de las bobinas inductoras y por la manera de conectarlas al arrollamiento del inducido.

Conexión serie. El motor en conexión serie tiene las bobinas inductoras formadas por unas pocas espiras de hilo grueso, conectadas en serie con el arrollamiento del inducido (fig. 6). Este motor posee un par de arranque elevado y una característica de velocidad suave (todo aumento de carga provoca una disminución de la velocidad y viceversa), el motor serie se emplea generalmente para accionar grúas, sobrestantes, trenes eléctricos, etc.



Conexión derivación. El motor derivación tiene las bobinas inductoras compuestas por muchas espiras de hilo fino, conectadas en paralelo con el arrollamiento del inducido *fig. 7*. Este motor posee un par de arranque mediano y una característica de velocidad dura (la velocidad es prácticamente independiente a las variaciones de la carga), por lo que encuentra aplicación en accionamientos que exigen una velocidad constante como taladoras y tornos.



Los motores derivación de cierta potencia suelen estar provistos de un pequeño arrollamiento adicional en serie con el inducido, el cual tiene por objeto evitar embalamiento eventual del motor o bien conseguir una ligera reducción de la velocidad cuando la carga aumenta.

CAPÍTULO

II

***ECUACIÓN DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DE
CORRIENTE CONTINUA Y CARACTERÍSTICAS DE
LA CONEXIÓN SERIE Y DERIVACIÓN***

2.1 ECUACIÓN BÁSICA DE VELOCIDAD

En un motor de corriente directa, la f.e.m. inducida y la intensidad del inducido está en oposición, *fig. 8*

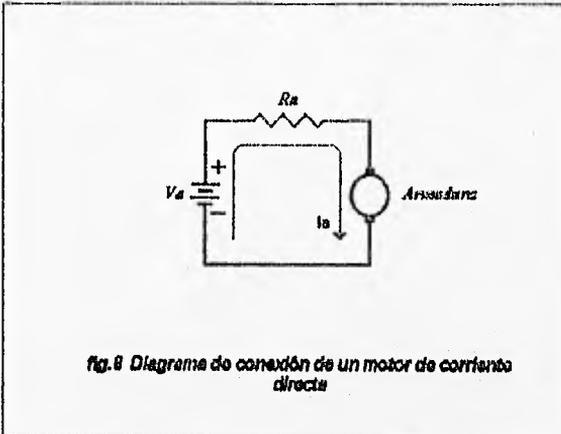


fig. 8 Diagrama de conexión de un motor de corriente directa

Debido a ello el voltaje medido en terminales de la armadura considerando la misma en condiciones estacionarias, es :

$$V_a = E + I_a R_a + \Delta V \dots\dots\dots (1) \quad (\text{Volts})$$

Donde :

- V_a = Voltaje de armadura (Volts)
- E = Fuerza contraelectromotriz (Volts)
- I_a = Corriente de armadura (Amp.)
- R_a = Resistencia de armadura (Ohms)
- ΔV = Pérdidas de escobillas (Volts)

Si tomamos en cuenta que las pérdidas por escobillas, en comparación a las otras caídas de voltaje son despreciables, tenemos que:

$$\Delta V \rightarrow 0$$

De donde la ecuación 1, queda como sigue :

$$V_a = E + I_a R_a \dots\dots\dots (2) \quad (\text{Volts})$$

Despejando de la ecuación 2, la fuerza contraelectromotriz, se obtiene :

$$E = V_a - I_a R_a \dots\dots\dots (3) \quad (\text{Volts})$$

Por otro lado tenemos que la fuerza contraelectromotriz en términos de las características constructivas de la máquina de corriente directa, es de la siguiente forma:

$$E = \frac{Zpn\phi * 10^{-8}}{a * 60} \dots\dots(4) \quad (\text{Volts})$$

$E =$ Fuerza contraelectromotriz (Volts)

$Z =$ Número de conductoras en armadura

$p =$ Número de polos

$\phi =$ Flujo por polo en líneas

$n =$ Velocidad (rpm)

$a =$ Número de trayectorias paralelas en la armadura

Si consideramos que Z , p , y a , como constantes que dependen de las características constructivas de la máquina, y que se pueden juntar los valores numéricos para formar una constante, tenemos:

$$k \approx \frac{Z p * 10^{-8}}{a * 60}$$

Sustituyendo la anterior expresión, en la ecuación 4, tenemos:

$$E = kn\phi \dots\dots(5) \quad (\text{Volts})$$

Despejando n , y sacando el recíproco de k , llamándola k_1 , tenemos la siguiente expresión:

$$n = \frac{E}{k\phi} \approx k_1 \frac{E}{\phi} \rightarrow \rightarrow n = k_1 \frac{E}{\phi} \dots\dots(6) \quad (\text{rpm})$$

Sustituyendo la ecuación 3 en 6, resulta la ecuación de la velocidad básica de un motor de corriente directa.

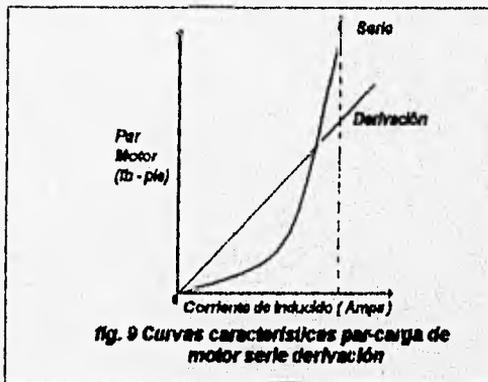
$$n = k_1 \frac{V_a - I_a R_a}{\phi} \quad (\text{rpm})$$

2.2 CARACTERÍSTICAS PAR, VELOCIDAD DE LA CONEXIÓN SERIE Y DERIVACIÓN EN UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

Conexión Serie

Si sabemos que la ecuación básica de par de un motor de corriente continua esta dada por $T = k\phi I_a$, el motor serie produce la curva de par indicada en la *fig. 9*. En un motor serie, las corrientes de inducido y de excitación serie son iguales (sin tener en cuenta los efectos de la resistencia en derivación) y el flujo producido por la excitación serie ϕ , es en todo momento proporcional a la corriente del inducido I_a . La ecuación básica del par para el funcionamiento del motor serie se convierte por consiguiente en $T = k'' I_a^2$. Hasta que el circuito magnético de la excitación esta no saturado (o sea, sobre la parte lineal de su curva de magnetización), la relación entre el par del motor serie y la corriente de carga es exponencial.

Debe notarse que el par del motor serie a cargas muy pequeñas (valores reducidos de I_a) es menor que el del motor derivación debido a que desarrollan menos flujo. Sin embargo para la misma corriente de inducido a plena carga, su par es mayor, como se pone en relieve comparando las dos ecuaciones, respectivamente.



La ecuación básica de la velocidad , modificada para el circuito del motor serie, es evidentemente :

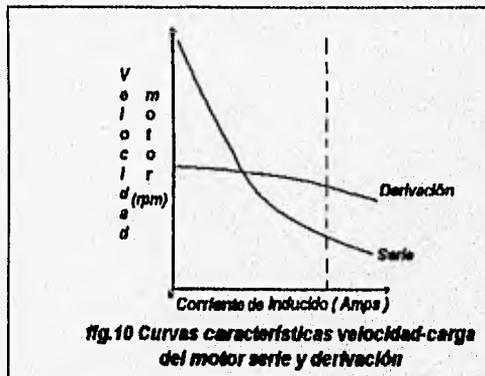
$$n = \frac{V_a - I_a (R_a + R_s)}{k \phi}$$

en la que V_a , es la tensión aplicada a los bornes del motor y puesto que el flujo en el entrehierro producido por la excitación serie es proporcional a la corriente del inducido, solamente la velocidad puede escribirse en la forma:

$$n = K' \frac{V_a - I_a (R_a + R_s)}{I_a}$$

La ecuación nos proporciona una indicación de la característica velocidad -carga de un motor serie. Si se aplica una carga mecánica relativamente pequeña al eje del inducido de un motor serie, la corriente del inducido I_a es pequeña, lo que hace que el numerador de la fracción en la ecuación sea grande y su denominador pequeño, determinando una velocidad anormalmente elevada.

Por consiguiente, en vacío, con un flujo de excitación y una corriente de inducido pequeñas, la velocidad es realmente excesiva. Por ésta razón, los motores serie siempre se accionan acoplados o engranados con una carga, como en ascensores, grúas o servicio de tracción de c.c. (ferrocarriles). Sin embargo, al aumentar la carga , el numerador de la fracción en la fórmula disminuye más rápidamente que lo que aumenta el denominador (el numerador disminuye según el producto de I_a , en comparación con el denominador que aumenta en proporción directa con I_a) y la velocidad disminuye rápidamente, como se indica en la *fig.10* . La línea discontinua representa la parte de carga ligera de la característica en la que no se hacen funcionar los motores serie.



Como se indica en la *fig. 10*, la velocidad excesiva en un motor serie no determina una corriente de inducido elevada (como en los motores de inducción y compound) que provocaría la fusión de un fusible o el disparo de un interruptor automático y separando el inducido de la red. Debe utilizarse algún otro método de protección contra el embalamiento. En general los motores serie están equipados con interruptores centrífugos, normalmente cerrados en la zona de funcionamiento y que se abren a velocidades aproximadamente al 150% de la velocidad nominal.

Conexión Derivación

Durante el período de arranque y de marcha, la corriente en el circuito de excitación en derivación, como se indica en la *fig. 9*, es esencialmente constante para un ajuste determinado del réostato de campo y en consecuencia el flujo (por el momento) es también esencialmente constante. Al aumentar la carga mecánica, el motor disminuye ligeramente su velocidad, originando una disminución en la fuerza contraelectromotriz y un aumento en la corriente del inducido.

De la ecuación básica del par, ($T = k\phi I_a$) se tiene que, si el flujo es esencialmente constante y si la corriente del inducido aumenta directamente con la aplicación de carga mecánica, la ecuación del par para el motor en derivación puede expresarse como una relación perfectamente lineal $T = k' I_a$ indicada en la *fig. 9* (para el motor derivación).

Supongamos que el motor derivación de la *fig. 10*, ha sido llevado hasta la velocidad nominal y funciona en vacío. Puesto que el flujo de excitación del motor (sin tener en cuenta la reacción del inducido) puede considerarse constante, la velocidad del motor puede expresarse según la ecuación básica de la velocidad

$$n = \frac{E}{k' \phi_f} = k \frac{V_a - I_a R_a}{\phi_f}$$

Quando al eje del inducido se aplica una carga mecánica, la fuerza contraelectromotriz disminuye y la velocidad lo hace proporcionalmente. Pero ya que la fuerza contraelectromotriz desde vacío hasta plena carga representa una variación de aproximadamente el 20 % (o sea, desde $.75 V_a$ a plena carga hasta aproximadamente $0.95 V_a$ en vacío), la velocidad del motor se mantiene esencialmente constante como se indica en la *fig. 9*.

CAPÍTULO

III

*MÉTODOS DE VARIACIÓN DE VELOCIDAD PARA
UN MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA*

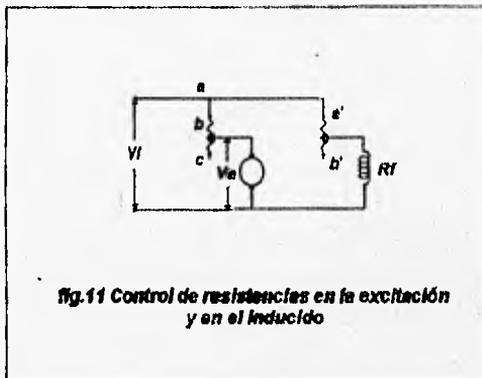
Antecedentes

Como anteriormente mencionamos la velocidad de un motor de corriente directa, puede variarse mediante el cambio de una de las variables de la ecuación fundamental de la velocidad:

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

3.1. MODIFICACIÓN DEL FLUJO DE EXCITACIÓN. ϕ .

Por medio de un reóstato variable serie o shunt, como se muestra en la *fig. 11*, se puede modificar el flujo de excitación, este método es mejor conocido como control de campo. Cuando se aplica la tensión nominal o de línea al inducido de un motor de c.d. ($V_a = V_l$) y el flujo de campo se varía manual o automáticamente por medio de un reóstato de campo en serie o en paralelo con el devanado de excitación.



La velocidad alcanzada con la plena tensión de inducido y plena corriente de excitación (resistencia de campo no añadida) se denomina velocidad básica de motor. Por consiguiente, incrementando la resistencia del campo disminuirá la corriente y el flujo de excitación de la ecuación fundamental de la velocidad, haciendo que aumente la velocidad. De ahí que deba decirse que el control de campo sólo puede originar velocidades por encima de la básica.

Características.

- 1) Es relativamente económico y sencillo de lograr, tanto en forma manual como automática.
- 2) Es eficaz en términos del rendimiento del motor.
- 3) Dentro de ciertos límites, no afecta la regulación de la velocidad.
- 4) Permite un control de velocidad relativamente suave y continuo.
- 5) Las pérdidas del circuito de excitación son apenas del 3 al 5% de la potencia absorbida por el motor (buen rendimiento).
- 6) La variación que se logra es a partir de la velocidad básica hacia arriba.
- 7) Si el campo es debilitado considerablemente, se originan velocidades peligrosas y elevadas, puesto que el aumento de velocidad se consigue mediante la debilitación del flujo de excitación dentro de ciertos límites.
- 8) Debido al inciso anterior, los motores de corriente continua se arrancan a plena corriente de campo.
- 9) En este tipo de arreglo, se tiene que establecer un límite máximo permisible de exceso de velocidad, éste es 1.5 veces de velocidad básica.
- 10) Inestabilidad a elevadas velocidades debido a la reacción de inducido.
- 11) Dificultades en la conmutación y posible deterioro del conmutador a elevadas velocidades.

3.2 CONTROL POR LA RESISTENCIA DE INDUCIDO

Por medio de este método el resisto de campo se ajusta de forma que se produce la excitación normal y se reduce la tensión en bornes del inducido, a través de una resistencia variable en serie con el inducido, *fig. 12.*

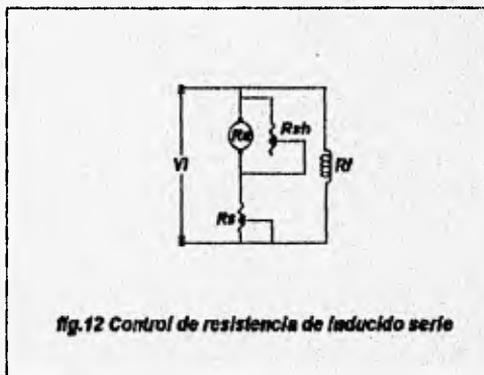


fig.12 Control de resistencia de Inducido serie

El control de velocidad se obtiene mediante la regulación de la resistencia en serie con el inducido. Aumentando la resistencia en serie del inducido, se reduce su tensión en bornes (a una determinada carga) en la ecuación fundamental de la velocidad, haciendo que la velocidad descienda. El control de la resistencia de inducido sólo puede originar velocidades por debajo de la básica y la corriente de inducido es función de la carga.

Características.

- 1) La posibilidad de alcanzar velocidades por debajo de la básica
- 2) Simplicidad y facilidad de conexión
- 3) La posibilidad de combinar las funciones de arranque del motor con el control de la velocidad.
- 4) Un costo relativamente elevado de las resistencias grandes, adecuadas para servicio continuo, capaces de disipar grandes cantidades de energía.
- 5) Pobre regulación de la velocidad para un determinado ajuste de la misma
- 6) Rendimiento bajo que se traduce en un elevado costo de funcionamiento
- 7) Dificultad de obtener un control continuo de la velocidad para potencias grandes.

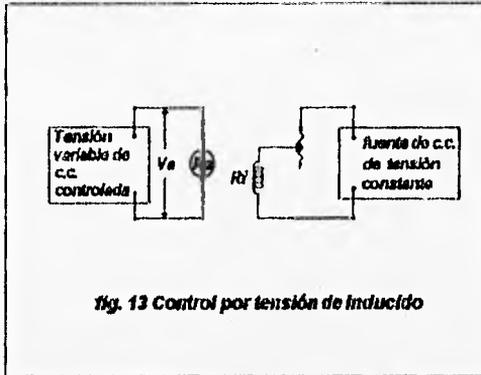
La combinación del control de los anteriores proporciona un medio eficaz y relativamente barato de obtener velocidades por encima y por debajo de la básica para un motor de c.c.

3.3 CONTROL DE LA TENSIÓN DE INDUCIDO

El rendimiento relativo de un motor de corriente continua, depende fundamentalmente de un par constante, regulación suave y control de velocidad eficiente. Las cargas fuertes, con gran inercia, requieren una aceleración suave durante una amplia gama de velocidades.

Todos estos requerimientos pueden satisfacerse mediante el empleo de una tensión variable de c.c., de una fuente de alimentación de capacidad suficiente para proporcionar a un motor de c.c. la tensión y corriente de inducido requeridas. El campo queda siempre excitado separadamente desde una fuente de alimentación de corriente o tensión constantes.

Este método de control también elimina la necesidad de una resistencia de arranque en serie con el inducido como se muestra en la *fig 13*.



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, $S = k(V_a - I_a R_a) / \phi$, 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 bornes del inducido. Reduciendo la tensión del inducido a cero, e invirtiendo la polaridad de la fuente de tensión variable, se parará el motor y se invertirá el movimiento de acuerdo con la regla de la mano izquierda *fig 1*.

Características

1. Control de velocidad desde 0 rpm hasta la velocidad nominal
2. Regulación eficiente
3. Control suave y eficiente
4. Sin riesgo de pérdida de campo, el campo es alimentado independientemente.
5. Conexión fácil
6. Combina un arranque progresivo con el control de la velocidad
7. Facilidad para la implementación de inversión de giro

Por lo anterior este método es el más socorrido en la industria, del mismo modo que a la par, el avance en el conocimiento en la electrónica, semiconductores y electrónica de potencia, encuentra una implementación excelente para el control de velocidad de un motor de c.c. a partir de una fuente rectificadora de voltaje de c.a., para la alimentación del inducido. Pero no sólo eso, también se dan las bases y condiciones para implementar un control de velocidad automático, tema que describiremos en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO

IV

CONTROL AUTOMÁTICO DE VELOCIDAD

Antecedentes.

La medición y el control automático pueden ser parciales, totales o de alguna extensión intermedia. El control comprende siempre un valor predeterminado llamado punto fijo o de ajuste. El sistema se diseña para medir y controlar económicamente cualquier desviación de la variable dentro del alcance y rango de los controles, de manera que se mantenga el valor predeterminado dentro de los límites escogidos con el objeto de producir un artículo de calidad.

La medición automática y los sistemas de control operan con base en un principio de error y establecen un límite definido de su valor. El sistema de medición detecta el error y produce una medición para indicar que se requiere un control manual, o bien el propio medidor la realiza en forma automática mediante un sistema de control para corregirlo. Normalmente, esto se logra mediante alguna forma de sistema de retroalimentación, anticipación o alimentación directa. La precisión necesaria en el control del sistema, al igual que la velocidad de respuesta para la acción correctiva en una aplicación particular, determinan tanto el tipo del sistema como su costo. La variedad disponible es desde un simple conmutador manual hasta un complejo sistema de control por computadora.

4.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE CONTROL PARA MAQUINAS DE

CD

Control .- Regular, dirigir determinada variable.

Sistema .-Conjunto de elementos establecidos para un fin determinado, el cual consta de una entrada y una salida *fig 14*.

Entrada .-Excitación o estímulo aplicado a un sistema de control, desde una fuente de energía de tal magnitud, que produzca una respuesta especificada en el mismo. *fig 14*

Salida .- Es la respuesta actual que se obtiene del sistema, que debe ser igual en la proporción requerida a la entrada. *fig 14*



Servosistema .- Sistema de tipo automático escalable, capaz de regular, controlar y fijar a un valor determinado la variable en cuestión .

Regulador ó controlador .- Sistema que realiza funciones preventivas, correctivas y de protección para estabilizar cierta variable a un valor predeterminado

Funciones del regulador :

A un regulador no solo se le pide que haga coincidir el valor de la variable primaria, en este caso un voltaje que representa la velocidad, con una magnitud de referencia, sino que también se le pide que realice un cierto número de funciones necesarias para el buen funcionamiento de la máquina :

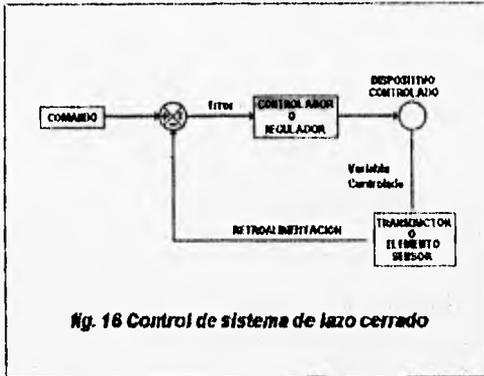
- a) Limitar magnitudes críticas, como pueden ser la corriente y la tensión del inducido. Esto es una función de protección . El concepto es simple, si se alcanza el valor límite de la variable secundaria , el sistema de regulación abandona el control de la variable primaria y se dedica a vigilar a la variable secundaria, intentando mantenerla dentro de un valor límite .
- b) Control preciso de las variables de tal forma que se eviten evoluciones excesivamente rápidas de las mismas . Por ejemplo el control del gradiente de corriente de un inducido es necesario para obtener una conmutación y como consecuencia para mantener el colector en buen estado.

Referencia .- Valor preestablecido de entrada.

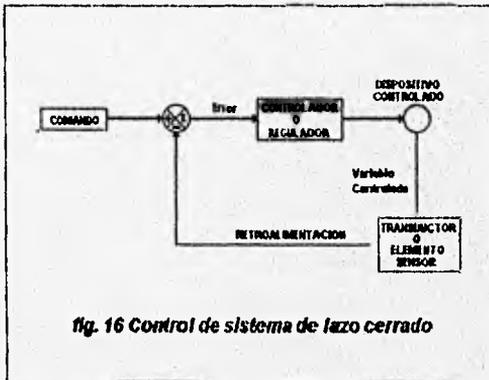
Retroalimentación .- Señal generada en la respuesta del sistema y direccionada a la entrada del mismo.

Transductor .- Mecanismo que convierte de una forma de energía a otra. El término es generalmente aplicado a mecanismos que toman un fenómeno físico (presión, temperatura, humedad, velocidad, etc.) y son convertidos a señales eléctricas.

Sistema de lazo abierto .- Son aquellos que la entrada no tiene ninguna inferencia en la salida. *fig 15*.



Sistema de lazo cerrado .- Son aquellos que la entrada si tiene inferencia en la salida, se les conoce como sistemas de retroalimentación *fig 16*



Punto suma .- Es la interacción de dos o más señales de control y retroalimentación que se suman algebraicamente para que su resultante sea usada como control del sistema. Por cada punto suma se tiene una retroalimentación.

Error .- Es el resultado de la comparación entre la referencia y la retroalimentación en el punto suma.

Ganancia .- Se define como la capacidad de amplificación en respuesta de un sistema determinado.

El objetivo de cualquier servo sistema es controlar alguna variable y medir la respuesta de esa variable a un comando determinado. Tal es el caso del regulador de CD, no puede ejecutar nada por sí mismo, debe tener un comando o referencia de entrada para calificarlo como un "regulador", sin embargo, debe recibir una retroalimentación para compararla con la referencia. Esta retroalimentación debe venir de la variable controlada, la cual puede ser velocidad, voltaje, corriente, tensión, posición o cualquier otra. Esta retroalimentación debe estar en las mismas unidades que la referencia. Si ésta retroalimentación no puede ser obtenida en las mismas unidades que la referencia (volts, amperes, etc.) entonces debe ser usado un transductor para hacer la retroalimentación compatible con la referencia. Estos transductores suelen ser tacómetros, celdas de carga, resistencias derivadoras, reactores, potenciómetros, transductores de presión y dispositivos medidores de presión.

Existen al menos tres razones importantes para utilizar un sistema realimentado:

- 1) Es un medio muy cómodo para realizar las relaciones deseadas entre la entrada y la salida
- 2) Permite compensar de forma interna las imprecisiones emanadas de las características de los componentes del sistema.
- 3) Minimiza las perturbaciones que proceden del exterior del sistema y que afectan la salida.

En accionamientos de CD, esa referencia y retroalimentación, generalmente están dados en volts o amperes. Los reguladores generalmente "los ven" en términos de milivolts y miliamperes. Sin embargo, el dato en sí (referencia y retroalimentación) debe sufrir alguna atenuación y/o escalonado prioritario para alcanzar el control.

En la *fig. 17* del servosistema, se encuentran los elementos básicos necesarios para tener un sistema controlado. Este sistema de lazo cerrado consiste en un comando, una retroalimentación, un error, el controlador, la potencia de actuación que el controlador provee, el dispositivo controlado, la variable controlada y un transductor, el cual genera la retroalimentación. En muchos casos de accionamientos, el comando o referencia tomará la forma de un potenciómetro reflejando velocidad, voltaje, flujo o alguna otra variable a ser

controlada. El error es el resultado de la comparación entre la referencia y la retroalimentación, en otras palabras la referencia le dice al sistema cual es el valor requerido a controlar.

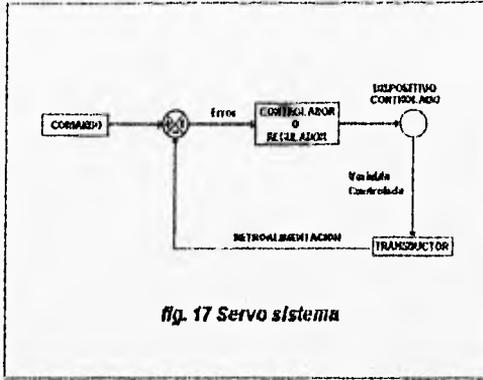


fig. 17 Servo sistema

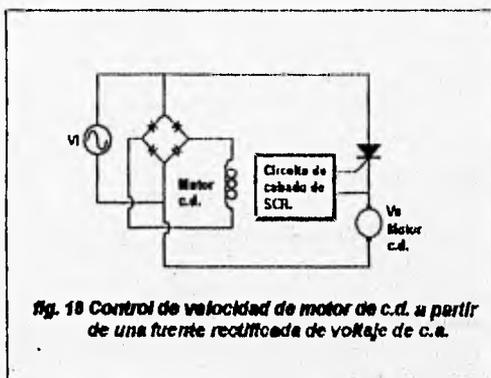
El error es la diferencia en señal desarrollada. El controlador actúa sobre ésta señal de error de tal forma que se entregue más o menos potencia al dispositivo controlado y cambie la variable controlada, de tal forma que el transductor, el cual genera la retroalimentación, llevará al sistema a un alineamiento con lo que se le está indicando. En general, el controlador tendrá una ganancia significativa, este será capaz de saturar al dispositivo controlado. Por lo tanto, las funciones limitadoras son utilizadas para prevenir algún daño al dispositivo controlado. Esas funciones de límite toman la forma de "ajustes de límite" para evitar daño alguno del dispositivo controlado. La figura anterior es un sistema general, el cual no tiene distinciones entre los diversos sistemas eléctricos, hidráulicos, neumáticos o mecánicos. Este es sólo un modelo de servosistema, el cual podemos examinar con detalle para determinar como trabajan los sistemas de control.

4.2 PRINCIPIO DEL CONTROL AUTOMÁTICO ELECTRÓNICO.

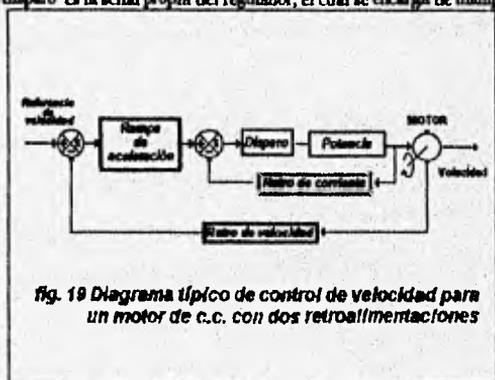
A éstas alturas se han analizado aspectos del funcionamiento y construcción de motores de corriente continua, el método más común para gobernar la velocidad del mismo, así como las bases del control automático enfocadas a la máquina de corriente directa. El siguiente paso es implementar el lazo de control necesario para controlar la velocidad de un motor de c.d.

Para ello se requiere controlar la tensión en el inducido, ésta tensión debe ser regulada dependiendo totalmente de la velocidad que presenta el motor en ese momento, ésta velocidad sólo puede ser realimentada en términos eléctricos. Por ello es necesario un transductor que realimente al punto suma, para manipular la información y activar la regulación.

Es importante recordar que un SCR puede ejecutar la mayoría de los trabajos de un reóstato, en el control del promedio de la corriente a una carga. Además un SCR no posee los inconvenientes de los reóstatos de alta potencia. Los SCR son pequeños, baratos y eficientes en energía. Por lo tanto parece natural acoplar el motor al punto de y el SCR para proporcionar control de velocidad por voltaje en armadura. Por lo anterior el esquema funcional quedaría, *fig 18*.



El circuito regulador debe estar compuesto de dos etapas: disparo y potencia, según lo mostrado en la *fig. 19*. La etapa de disparo es la señal propia del regulador, el cual se encarga de manipular la referencia de



velocidad, sus retroalimentaciones y rampas de incremento de velocidad, necesarios para un control eficiente, involucrando a su vez, los parámetros de seguridad adecuados para la operación confiable del servosistema

Es evidente que mediante el puente rectificador de diodos podemos proporcionar voltaje directo al campo. También es evidente que interviniendo el ángulo de disparo de los SCR, se obtiene una regulación de la corriente aplicada a la armadura del motor. *fig 18.*

Como ya se mencionó, para efectos de un control estricto del cebado de los SCR's, éstos deben depender en gran medida de los parámetros de velocidad de la flecha y para protección, también deben depender de la corriente en armadura, para evitar excesos de corriente, primero al arranque y luego por efectos de cargas variantes y excesivas. Es decir, mínimamente la velocidad debe depender tanto de la corriente que circula por la armadura, como de la velocidad que la flecha realmente, esquemáticamente esto puede representarse como se ilustra en la *fig. 19.* En los sistemas de control, las realimentaciones, mientras más internas sean, más prioridad tienen sobre las otras, es necesario colocar la realimentación de corriente "más interna" que la de velocidad para proteger el motor de eventuales subidas de carga. En la práctica, cada bloque mostrado debe construirse, de manera general en:

Potencia : Está formado por un puente rectificador a base de SCR's

Disparo: Se construye con cualquier elemento electrónico que proporcione pulsos de corriente capaces de cebar la compuerta de los SCR's

Rampa de Aceleración: Constituida por elementos capaces de pasar de 0 volts que representa un nivel de no disparo para los SCR's, a un nivel entre 10 y 15 Voltu que cebe a los SCR's, pero con la condición de que el cambio sea lineal.

Realimentación: Suele requerir de transductores que permitan manejar las señales de una manera homogénea.

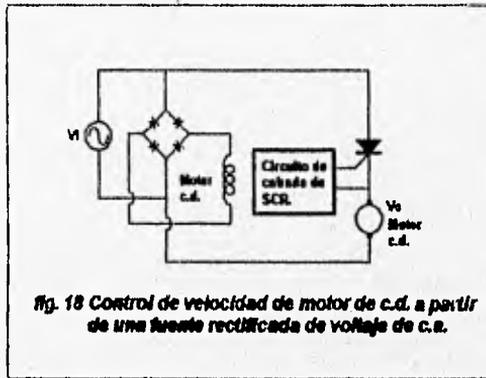
Regulador : Probablemente el punto de mayor interés en el sistema, que consta principalmente de "puntos suma", que se encargan de las operaciones de comparación, compensación, sumas y restas de señales de referencia y retroalimentación. Básicamente, la construcción de éstos puntos se basa en dispositivos electrónicos, aunque la complejidad de los sistemas actuales requiere de una combinación de varias de éstas operaciones para el control eficiente del motor de corriente directa.

APÉNDICE

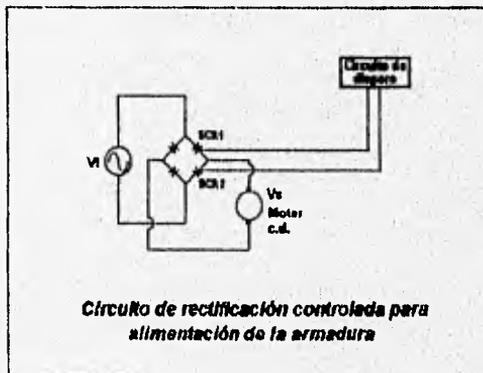
A continuación se implementa el circuito electrónico de un control automático para un motor de c.d. Se muestran los bloques electrónicos de cada una de las etapas necesarias para el control, así como el circuito global mínimo necesario, para implementar el mismo.

Aclarando que sólo es un prototipo el cual puede ser alterado dependiendo de las necesidades y requerimientos del sistema a controlar:

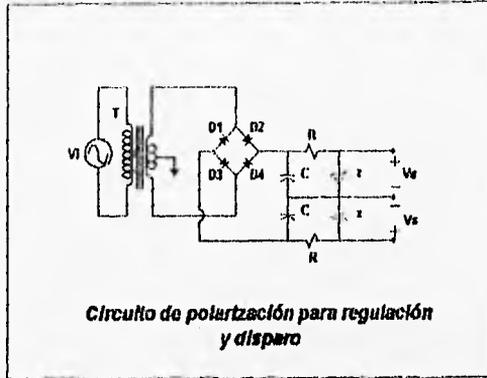
1. Circuito rectificador a partir de una fuente de c.a para alimentar al campo y armadura



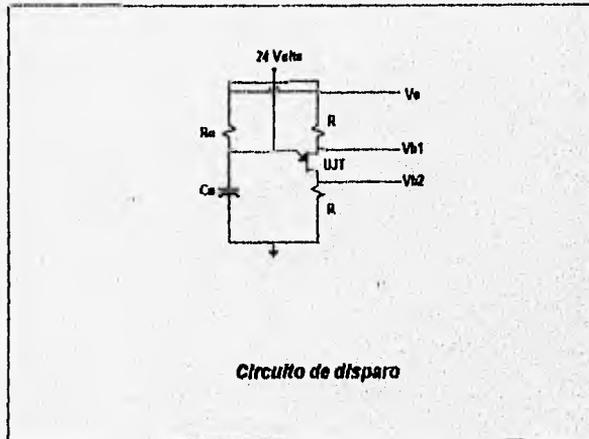
2. Circuito rectificador controlado de c.d. de una fuente de corriente alterna para el control de la tensión del inducido del motor



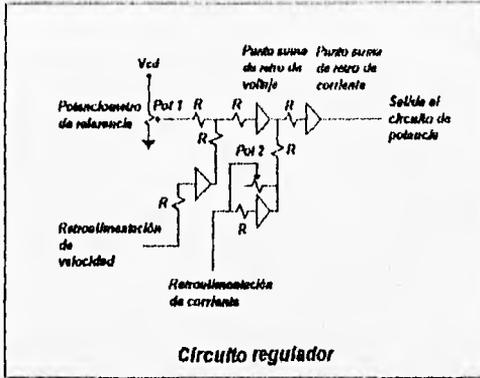
3. Circuito de polarización para circuitería de regulación y disparo



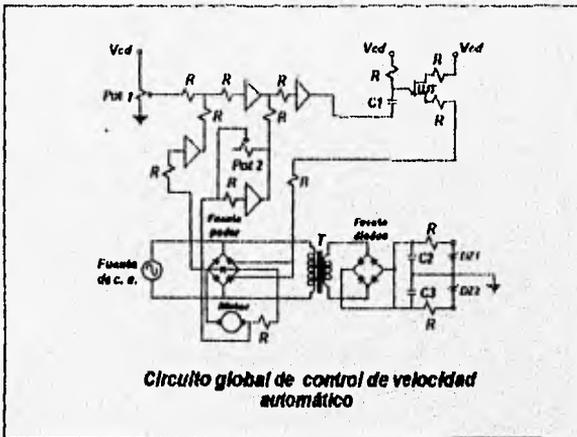
4. Circuito de disparo



5. Circuito regulador



6. Circuito Global de Control de velocidad automático por tensión de inducido



CONCLUSIONES

Invariablemente el motor de corriente directa es ideal para infinidad de aplicaciones en la industria, por sus características de trabajo rudo y continuo, par constante en una amplia gama de velocidades; así como la facilidad que implica la implementación del control de velocidad a partir de la regulación de la tensión de inducido

Siendo indispensables en industrias papeleras, devanadoras, molineras etcétera, por la virtud del mismo para el control de velocidad entre dos o más partes de una determinada línea de producción, sin mencionar el bajo costo que implica su mantenimiento tanto correctivo como preventivo.

El control automático del motor a partir de la regulación de la tensión de inducido es una alternativa muy viable para eliminar tiempos muertos, incrementar la producción y optimizar los procedimientos en una aplicación determinada; sin dejar de mencionar la facilidad que representa el hacer crecer la productividad, solo siendo limitado por las características propias del motor a controlar.

En la actualidad existe en el mercado una amplia gama de controles de velocidad electrónicos para motores de c.d. por regulación de tensión de inducido, siendo la finalidad principal de éste trabajo, dar un enfoque global de su funcionamiento y características, proporcionando así los elementos necesarios para poder tomar una decisión adecuada, que nos resuelva la problemática del sistema motriz a automatizar.

BIBLIOGRAFIA

ROBERT W. SMEATON
MOTORES ELÉCTRICOS
SELECCIÓN MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN
EDITORIAL MAC GRAW HILL
MÉXICO 1991

GEORGE J. THALER
MÁQUINAS ELÉCTRICAS
ESTADO DINÁMICO Y PERMANENTE
EDITORIAL LIMUSA
MÉXICO, 1984

IRVING L. KOSOW, PH.D.
CONTROL DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS
EDITORIAL REVERTÉ
ESPAÑA, 1979

HAROLD E. SOISSON
INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL
EDITORIAL LIMUSA
MÉXICO, 1994