



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN**

**ESTUDIO Y ANALISIS DE UN  
VARIADOR DE VELOCIDAD  
PARA MOTORES DE C. D.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
PRESENTAN:**

**CARLOS SERVANDO LOPEZ MONTES  
FRANCISCO JAVIER CARRILLO GARCIA**



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 está 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.

## INDICE

Introducción	1
1. CONTROL Y OPERACION DE LOS MOTORES	4
1.1 Control manual	5
1.2 Control semiautomático	6
1.3 Control automático	7
1.3.1 Control por interruptor de flotador	8
1.3.2 Control por interruptor de presión	9
1.3.3 Reloj de control de tiempo	9
1.3.4 Termostato	9
1.3.5 Interruptor de límite	9
1.4 Selección de equipo	10
1.5 Arranque y paro	10
1.5.1 Frecuencia del arranque y el paro	10
1.5.2 Par de arranque	11
1.5.3 Paro rápido o lento	11
1.6 Control de la velocidad	12
1.7 Arranque de motores de c.c.	12
1.8 Control de la velocidad de los motores de c.c.	15
1.8.1 Protección contra sobrecarga	16
1.8.2 Protección contra campo abierto	16
1.8.3 Protección contra sobrevelocidad	16
1.8.4 Protección contra inversión de corriente	17
1.8.5 Protección mecánica	17

1.8.6	Protección contra corto circuito	17
1.8.7	Aceleración por limitación de corriente	18
1.8.8	Aceleración por retardo de tiempo	18
2.	CONTROL CONVENCIONAL (Motores en Derivación)	19
2.1	Características de funcionamiento	19
2.2	Regulación de la velocidad en los motores en derivación	21
2.3	Variación de la velocidad en los motores en derivación mediante control del campo de excitación	23
2.4	Variación de la velocidad de un motor en derivación mediante control de la resistencia del inducido	23
2.5	Comparación entre la regulación de la velocidad -- por control de resistencia de inducido y por control del campo de excitación	25
2.6	Sistema Ward-Leonard de regulación de velocidad	27
2.7	Aplicaciones del sistema Ward-Leonard de regulación de velocidad	30
3.	ELECTRONICA BASICA	31
3.1	Teoría del diodo semiconductor	31
3.2	Transistores	34
3.2.1	El transistor en circuito abierto	36
3.2.2	Características de salida	36
3.2.3	El transistor en la región de corte en emisor común	37
3.2.4	Región de saturación de emisor común	38
3.2.5	El transistor en conmutación	38
3.3.	Tiristores	39
3.3.1	El tiristor bajo tensión directa	41
3.3.2	Principio de accionamiento por puerta	43

3.3.3	Curva característica del tiristor	46
3.3.4	Acción de la puerta	48
4.	CONTROL DE POTENCIA MEDIANTE SCR	50
4.1	Rectificación de potencia mediante SCR	50
4.1.1	Rectificación trifásica	52
4.2	SCR utilizado como interruptor	53
4.3	Regulación de potencia mediante SCR	54
5.	CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR DE C.C. MEDIANTE SCR	56
5.1	Comportamiento del motor de c.c.	56
5.1.1	Control del inducido	57
5.1.2	Control de excitación	60
5.2.	Constitución del motor para funcionamiento con tiristores	61
5.3	Fundamento de un sistema variador electrónico	63
5.3.1	Sistemas de control en anillo cerrado	66
5.3.2	Servosistema regulador	66
5.3.3	Diagramas de bloques de un sistema de control	67
5.3.4	Conexión de los bloques	68
5.3.5	Simplificación de un esquema de bloques. Forma canónica	70
5.3.6	Función de transferencia de un esquema en forma canónica	71
5.3.7	Estudio del control de excitación	73
5.3.8	Estudio del control de armadura	80
5.3.9	Comparación del comportamiento del motor de c.c. - controlado por inducido con el motor de c.c. controlado por campo	84
5.4	Regulador de velocidad con tiristores	85
5.4.1	Compensación de caída IR	86

5.4.2 Corriente límite	86
5.4.3 Control de aceleración	88
5.4.4 Funciones de interrupción	89
6. APLICACION (Trenes de Laminación)	91
CONCLUSIONES	100

## INTRODUCCION

En la presente tesis se hará un estudio sobre el control de la velocidad del motor de c.c., enfocado a un caso específico: el laminador.

Modernamente se usan los motores de corriente continua para conseguir variación de velocidad, debido principalmente a su facilidad de control y a su gran versatilidad.

Si bien existen convertidores de alterna/alterna para regular la velocidad de un motor de corriente alterna, existe una limitación económica y el mantenimiento requiere mayor preparación técnica para amejar potencias considerables. Por una parte el motor de corriente continua es mucho más caro que el de alterna, pero en cambio la circuitería y los elementos que constituyen el mando electrónico del motor de corriente alterna son más caros.

Este mayor coste se acentúa cuando se manejan grandes potencias. Para hacer dicha comparación debemos referirnos a equipos que suministren igualdad de características sobre la máquina a aplicar.

El control de la velocidad del motor es esencial, no solamente para hacerlo funcionar, sino para controlar su velocidad.

durante la marcha.

Los motores de inducción de jaula de ardilla (SCIM) no se prestan a ningún sistema de control de variación continua de la velocidad.

Los motores de corriente continua se utilizan principalmente por la facilidad de controlar su velocidad, por lo que son muy adecuados para el accionamiento de muchas máquinas, entre ellas el laminador.

Los motores derivación y mixtos se prestan bien a aplicaciones en que la consideración más importante es el control de velocidad.

El motor en derivación se denomina motor de velocidad constante porque su velocidad varía sólo ligeramente con la carga. Sin embargo, su característica más estimable es la de ser también un motor de velocidad regulable. Cuando se le provee de un control adecuado, puede proporcionar una regulación de velocidad precisa en un amplio margen; en esto se basa su principal aplicación.

Existe un método de control de velocidad de motores de corriente continua llamado Sistema Ward-Leonard. Su principal aplicación es en las fábricas siderúrgicas para accionar trenes reversibles de laminación.

Este tipo de control de velocidad tiene un costo elevado de instalación, puesto que se requieren tres máquinas para ha--

cer el trabajo de una. No obstante, la calidad del servicio es de suprema importancia y el costo de instalación es un factor -- relativamente secundario.

El ingreso de los SCR a la electrónica de potencia proporciona una excelente alternativa al sistema Ward-Leonard.

El equipo que satisface las exigencias de cada máquina es electrónico, no existiendo otro sistema que le supere en prestaciones, ya que con la electrónica podemos actuar fácilmente sobre variables de la máquina tales como pares, presiones, velocidades, temperaturas y muchas otras para obtener la respuesta deseada del motor. En definitiva todas esas variables determinarán la acción del motor en velocidad-tiempo o par, con precisiones incomparables a los sistemas anteriormente existentes de amplificadores magnéticos, decaladores, grupos rotativos, sistemas mecánicos o sistemas electromecánicos. La precisión puede ser de 0.1%, valor inalcanzable en dispositivos no electrónicos.

## CONTROL Y OPERACION DE LOS MOTORES

La palabra control significa gobierno, mando o regulación. Así, cuando hablamos del control de un motor o máquina, nos referimos al gobierno, mando o regulación de las funciones de dicho motor o máquina. Aplicados a los motores, los controles realizan varias funciones, tales como las de arranque, aceleración, regulación de velocidad, regulación de potencia, protección, inversión y paro.

Un controlador eléctrico es un dispositivo que controla o regula las funciones de un motor o de una máquina de manera pre determinada o en un orden de sucesión o secuencia asimismo pre determinado.

Algunas funciones que se pueden realizar por el control son:

Arranque.- El motor se puede arrancar conectándolo directamente a través de la línea. Sin embargo, la máquina impulsada se puede dañar si se aplica ese par de arranque. El arranque debe hacerse lenta y gradualmente, no sólo para proteger la máquina sino porque la corriente de la línea durante el arranque puede ser demasiado grande.

Paro.- Los controladores permiten el funcionamiento hasta la de

tención de los motores y también imprimen una acción de freno - cuando se debe detener la máquina rápidamente.

Inversión de la rotación.- Se necesitan controladores para cambiar automáticamente la dirección de la rotación de las máquinas mediante el mando de un operador en una estación de control.

Control de la velocidad.- Algunos controladores pueden mantener velocidades muy precisas para propósitos de procesos industriales pero se necesitan de otro tipo para cambiar las velocidades de los motores por pasos o gradualmente.

## 1.1 CONTROL MANUAL

El control manual es una forma de mando o regulación que se ejecuta manualmente en el mismo lugar en que está situado el dispositivo de control (Fig. 1-1). El más sencillo y conocido es probablemente el arrancador manual de pequeños motores a tensión nominal. Se utiliza frecuentemente este arrancador donde sólo es necesario la función de control para la puesta en marcha y paro del motor. El arrancador manual proporciona, generalmente, protección contra la sobrecarga pero no protección contra bajatensión.

El control manual se caracteriza por el hecho de que el operador debe mover un interruptor o pulsar un botón para que se efectúe cualquier cambio en las condiciones de funcionamiento de la máquina o del equipo en cuestión.

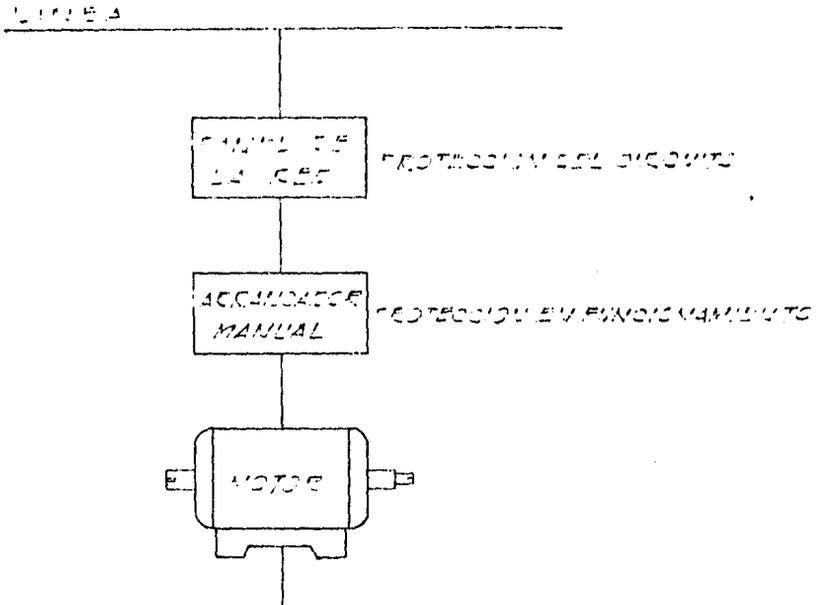


Fig. 1-1 Control manual de un motor.

## 1.2 CONTROL SEMIAUTOMATICO

Los controladores que pertenecen a esta clasificación utilizan un arrancador electromagnético y uno o más dispositivos piloto manuales, tales como pulsadores, interruptores de maniobra, combinadores de tambor o dispositivos análogos (Fig. 1-2). Probablemente los mandos más utilizados son los cuadros de pulsadores a causa de que constituyen una unidad compacta y relativamente económica. El control semiautomático se emplea principalmente para facilitar las maniobras de mando y dar flexibilidad a las maniobras de control en aquellas instalaciones en las que el control manual no es posible.

Este tipo de control requiere un operader que inicie cualquier cambio en la posición o condición de funcionamiento de la

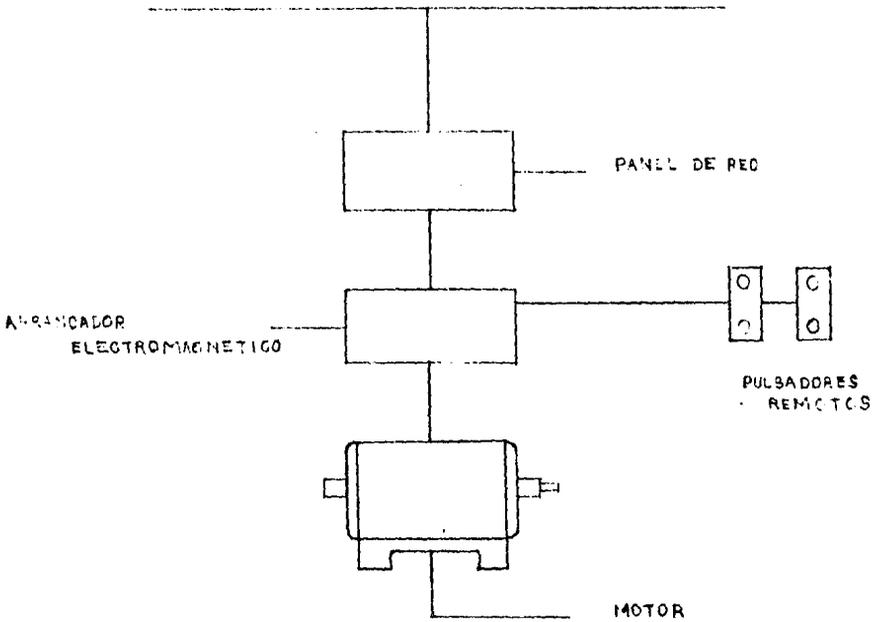


Fig. 1-2 Control semiautomático de un motor.

máquina. Mediante el uso del arrancador electromagnético puede realizarse este cambio desde un lugar o puesto de trabajo cómodo o necesario.

### 1.3 CONTROL AUTOMATICO

Un control automático está formado fundamentalmente por un arrancador electromagnético o contactor cuyas funciones están controladas por uno o más dispositivos piloto automáticos (Fig. 1-3). La orden inicial de marcha puede ser automática, pero generalmente es una operación manual, realizada en un panel de pulsadores o interruptores.

Muchas veces se cree que un sistema automático resultará -

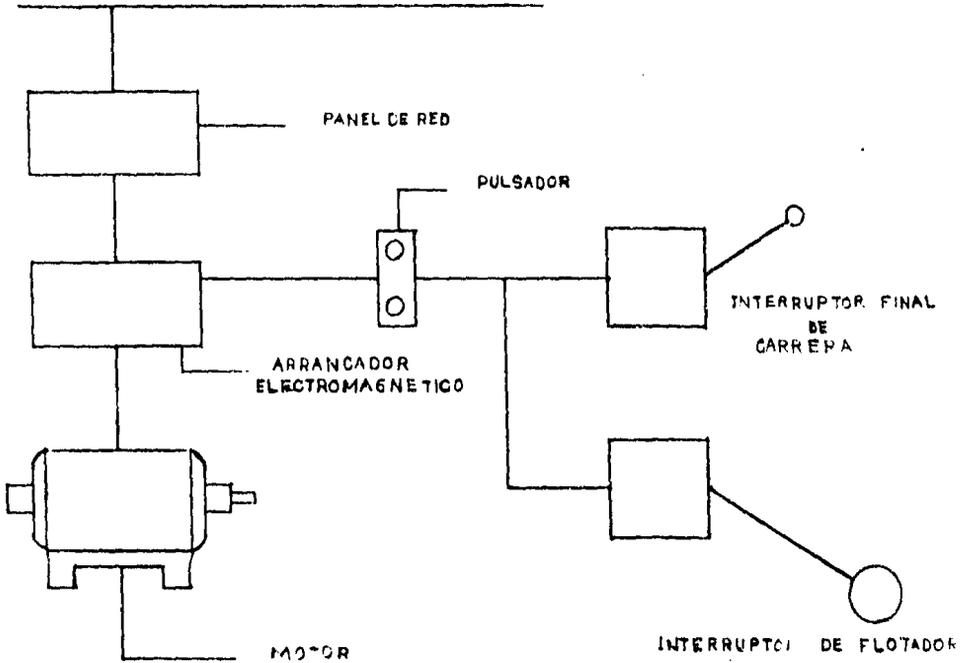


Fig. 1-3 Control automático de un motor.

más caro que cualquiera de los otros dos, pero si se tiene en cuenta que se ahorra el trabajo de un operario, bien puede resultar este método más ventajoso. También se tendrá en cuenta que el control automático resultará más exacto.

El motor se puede controlar desde un punto alejado, usando estaciones de botones. Deben incluirse interruptores magnéticos (dispositivos empleados para establecer, interrumpir o cambiar las conexiones en un circuito eléctrico por medio de la acción magnética) con las estaciones de botones para control remoto, o cuando los dispositivos automáticos no tengan la capacidad eléctrica para conducir las corrientes de arranque y marcha del motor. Si éste se controla automáticamente, pueden usarse los siguientes tipos de control:

1.3.1 Control por Interruptor de flotador.- La elevación o descenso de un flotador unido mecánicamente a contactos eléctricos

puede arrancar bombas impulsadas por motor para vaciar o llenar tanques, según se desee. También se utilizan para abrir o cerrar válvulas de tubería para controlar fluidos.

1.3.2 Por interruptor de presión.- Los interruptores de presión se emplean para controlar la presión de los líquidos y gases -- (aire) dentro de una amplitud deseada. Los compresores de aire, por ejemplo, se arrancan directa o indirectamente de acuerdo -- con la demanda de más aire, mediante un interruptor de presión.

1.3.3 Reloj de control de tiempo.- Cuando se requiere un periodo definido de "cerrado y abierto" prácticamente, sin necesidad de ajustes para largos lapsos, pueden usarse relojes para control. Un arreglo típico es un motor que debe arrancar a la misma hora y detenerse cada noche a una hora determinada.

1.3.4 Termostato.- Junto con dispositivos piloto sensibles a -- los niveles de los líquidos, presiones de los gases y hora del día, se utilizan ampliamente los termostatos sensibles a los -- cambios de temperatura. Estos controlan indirectamente motores grandes en los sistemas de acondicionamiento de aire y en muchas aplicaciones industriales. Hay muchos tipos diferentes de termostatos e interruptores que funcionan por la acción de la -- temperatura.

1.3.5 Interruptor de límite.- Los interruptores de límite se usan, probablemente, con más frecuencia, para parar máquinas, equipo y productos en proceso, durante el curso. Estos dispositivos piloto se emplean en circuitos de control de arrancadores magnéticos, para gobernar el arranque, el paro o la inversión de la rotación de los motores eléctricos.

## 1.4 SELECCION DE EQUIPO

En la selección del equipo para la puesta en marcha de un motor deben ser tenidos en cuenta varios factores generales. -- Los más obvio de ellos son la corriente, la tensión y la frecuencia nominales del motor y de los circuitos de control. Los motores necesitan protección de acuerdo con el tipo de servicio, tipo de motor y funciones de control que requieren.

El que se emplee un control de arranque a tensión nominal o uno a tensión reducida puede depender de la capacidad de corriente de la instalación de la planta y de las líneas de la compañía distribuidora de energía, así como de las tarifas. Otros factores tales como mandos para servicio intermitente, control de velocidad o el tipo de motor utilizado, también afectarán esta selección.

## 1.5 ARRANQUE Y PARO

Puede ser necesario en el arranque y el paro, considerar las siguientes condiciones a que se puede sujetar el motor y la máquina a él conectada:

1.5.1 Frecuencia del arranque y el paro.- El ciclo de arranque de todos los controladores es vital en su operación continua satisfactoria. Los interruptores magnéticos, como los que se emplean para los motores, relevadores y contactores, pueden estropearse en realidad, a sí mismos, por la apertura y cierre repetidos y continuos.

1.5.2 Par de arranque.- Algunos motores arrancan sin carga y otros lo hacen fuertemente cargados. El arranque de los motores puede causar grandes perturbaciones en la línea de alimentación que afecta todo el sistema de distribución eléctrica de una --- planta. Puede, aún, afectar al sistema de la compañía eléctrica.

1.5.3 Paro rápido o lento.- Es necesario que muchos motores paren instantáneamente. La producción y algunas exigencias de seguridad son tales, que es necesario hacer que las máquinas se detengan tan rápidamente como sea posible. Los controles automáticos y aplicados facilitan el retardo y frenan la velocidad de un motor y, en realidad, aplican un par en la dirección opuesta a la rotación. La regulación de la desaceleración es una fun--- ción de los controladores para motor.

Un motor de directa, como de alterna, se puede parar desconectándolo de la línea. Sin embargo, si el motor se reconecta - de manera que funcione como un generador, se parará más rápidamente. Esto se conoce como freno dinámico.

Si el motor se reconecta para que el campo se excite, y existe un paso de baja resistencia a través de la armadura, la acción de generador convertirá parte de la energía mecánica de rotación en energía eléctrica, en forma de calor, en las resistencias; esto baja más pronto la velocidad del motor. Al disminuir la velocidad del motor, la acción de generador se hace menor, disminuye la corriente y se reduce la acción de freno. Por tanto, un motor no se puede parar sólo mediante el sistema de freno dinámico.

La armadura se puede conectar a una resistencia para obtener la acción de freno dinámico que se describió antes, pero es más satisfactorio conectar, también, la armadura a la línea. En

esta forma se devuelve parte de la energía mecánica a la línea, y las resistencias no necesitan manejar tanto calor. Este proceso se denomina freno regenerativo.

## 1.6 CONTROL DE LA VELOCIDAD

El control de la velocidad del motor es esencial, no solamente para hacerlo funcionar, sino para controlar su velocidad durante la marcha.

Los motores de inducción de jaula de ardilla (SCIM) no se prestan a ningún sistema de control de variación continua de la velocidad, pero puede obtenerse éste en dos, tres o cuatro velocidades de acuerdo con la construcción del motor.

El motor de c.a. más apropiado para el control de velocidad es el de rotor devanado, llamado también de anillos rozantes. Mediante el uso del control rotórico o secundario, este tipo de motor puede tener tantos escalones de velocidad como se desee.

## 1.7 ARRANQUE DE MOTORES DE C.C.

Cualquier dispositivo que se utilice para poner en marcha un motor de c.c. de más de 1/4 HP debe disponer de algún medio de limitar la intensidad de arranque. Un motor de c.a. ofrece y

na alta impedancia, lo que limita la intensidad de arranque. El motor de c.c. ofrece sólo la baja resistencia del inducido para limitar la intensidad de arranque hasta que el motor empieza a girar.

Una vez iniciada la rotación, el arrollamiento del inducido comienza a cortar el flujo producido por el campo, y se genera una fuerza electromotriz en el inducido, de polaridad opuesta a la de la tensión aplicada y que se denomina fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.). El valor de la fuerza contraelectromotriz aumenta con la velocidad, hasta que a velocidad nominal es del 80 a 95% de la tensión aplicada.

La intensidad del inducido se calcula restando la fuerza contraelectromotriz de la tensión aplicada y dividiendo la diferencia por la resistencia del inducido. Cuando éste está en reposo, la fuerza contraelectromotriz es nula, por lo que la corriente del inducido es igual a la tensión aplicada dividida por la resistencia del inducido, que es muy baja, generalmente de 1 a 2 ohmios o menos.

Si suponemos una resistencia de inducido de 0.85 ohmios y una tensión aplicada de 110 voltios, la intensidad de arranque será de 129.4 amperios. A velocidad nominal la fuerza contraelectromotriz será aproximadamente 100 voltios y limitará la intensidad a 11.8 amperios. La corriente de arranque quedará limitada al 150% aproximadamente de la corriente de plena carga conectando una resistencia de 5.30 ohmios en serie con el inducido.

La resistencia serie debe ser suprimida en escalones cuando la aceleración del motor produce una f.c.e.m. creciente y re

duce la resistencia necesaria, hasta que a la velocidad de régimen se elimina toda la resistencia. Un motor de c.c. desarrolla su máxima potencia cuando la f.c.e.m. tiene su valor máximo.

Cuando se emplean motores de excitación serie o mixta (compound), la resistencia de arranque se conecta en serie con el inducido y con el devanado de la excitación serie. En el motor derivación la resistencia se conecta en serie únicamente con el inducido (Fig. 1-4).

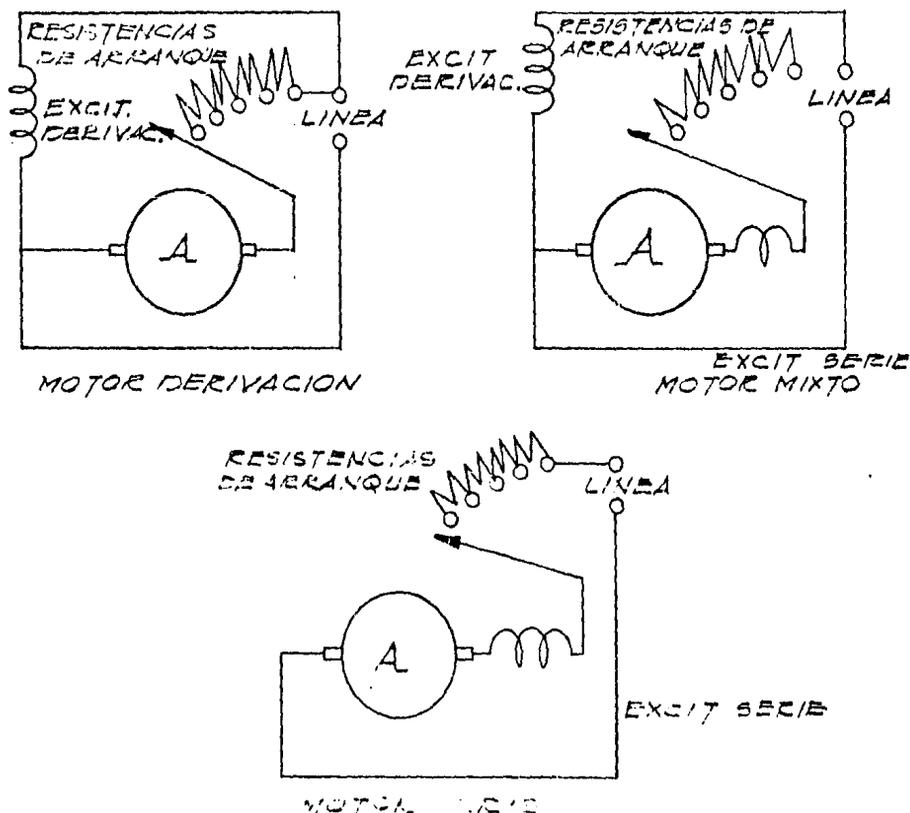


Fig. 1-4 Conexiones del réostat de arranque en c.c.

## 1.8 CONTROL DE LA VELOCIDAD EN LOS MOTORES DE C.C.

Los motores de corriente continua se utilizan principalmente por la facilidad de controlar su velocidad, por lo que son muy adecuados para el accionamiento de muchas máquinas.

Cuando un motor de c.c. tiene aplicadas sus tensiones nominales en el inducido y en el inductor o campo, gira a su velocidad de régimen. Las velocidades inferiores a ésta se obtienen manteniendo la tensión del campo en su valor nominal y reduciendo la tensión del inducido. Las velocidades superiores a la de régimen se obtienen manteniendo la tensión del inducido en su valor nominal y reduciendo la tensión aplicada a la excitación.

La velocidad del motor serie se controla mediante resistencias conectadas en serie con el inducido y el inductor. Las resistencias utilizadas para controlar la velocidad deben estar dimensionadas para un servicio continuo, a diferencia de las de arranque dimensionadas sólo para el período de arranque, ya que están siempre en servicio mientras se utilice el motor a velocidad inferior a la nominal.

El combinador más utilizado en los dispositivos de control de velocidad de los motores serie es el de tambor, empleado conjuntamente con resistencias tipo parrilla para servicio pesado.

Los motores derivación y mixtos se prestan bien a aplicaciones en que la consideración más importante es el control de velocidad. Cuando la velocidad deseada es superior a la de régimen (control de sobrevelocidad), se intercalan resistencias en serie con el devanado en derivación. Cuando la velocidad desea-

da es inferior a la de régimen (control de subvelocidad), se -- disponen resistencias en serie con el inducido.

Respecto al motor en sí, debe decidirse si se requieren o no las siguientes características de protección, y que tipo debe incluirse en cada instalación individual de control:

1.8.1 Protección contra sobrecarga.- La protección durante la -- marcha y contra sobrecarga se refiere al mismo caso. La protección contra sobrecarga es una característica esencial de todos los controladores, que se diseña para proteger adecuadamente un motor y obtener, aún, su máxima potencia disponible bajo cierta variedad de condiciones de sobrecarga y temperatura. La sobre-- carga puede originarse por un exceso de carga en la máquina imulsada, por un voltaje bajo en la línea, o por una línea abierta en un sistema polifásico, lo que resulta en operación monofá sica.

1.8.2 Protección contra campo abierto.- Existen relevadores de pérdida de campo para proteger los motores de c.c. en deriva--- ción, o de embobinado compuesto, contra pérdidas de excitación-- del campo.

Algunos motores de c.c. de ciertos tamaños pueden girar pe ligrossmente, con pérdida de la excitación del campo, mientras-- otros no pueden hacerlo debido a la fricción y al tamaño peque ño.

1.8.3 Protección contra sobrevelocidad.- En ciertos motores es-- posible que se desarrollen velocidades excesivas que pueden da ñar una máquina impulsada, materiales en el proceso industrial, o el motor. La protección contra sobrevelocidad puede compren--

der la selección y uso adecuado del equipo de control en aplicaciones tales como plantas de papel e impresión, fábricas de productos de acero, plantas de proceso e industria textil.

1.8.4 Protección contra inversión de corriente.- La inversión accidental de la dirección de la corriente en los controladores complejos y sensibles para corriente continua es muy grave. La protección contra inversión de corriente es muy importante en el equipo para cargar baterías.

1.8.5 Protección mecánica.- Una envolvente para una aplicación particular puede contribuir considerablemente a la duración y la operación sin dificultades de un motor y un controlador. Todas las envolventes, como las de propósito general, herméticas, a prueba de polvo, a prueba de explosión y resistentes a la corrosión tienen aplicaciones e instalaciones específicas.

1.8.6 Protección contra corto circuito.- Generalmente, la protección contra corto circuito se instala en la misma envolvente que el medio de desconexión del motor. Los fusibles que se instalan para este propósito, y los cortacircuitos, son dispositivos de sobrecorriente que tratan de proteger los conductores -- del circuito derivado del motor, los aparatos de control de éste, y los motores contra sobrecorriente sostenida debida a corto circuitos, escapes a tierra y corrientes prolongadas y excesivas de arranque.

La gran cantidad de sistemas automáticos de arranque y control que pueden usarse, se dividen en las siguientes clasifica-

ciones generales:

1.8.7 Aceleración por limitación de corriente (también llamado tiempo de compensación).- Esto se refiere a la cantidad de corriente o caída de voltaje necesarios para abrir o cerrar los interruptores magnéticos. La elevación y la caída de las corrientes y voltajes determina un período de control de tiempo que se usa principalmente para el control del motor de c.c.

Algunos de estos tipos son:

1. Aceleración por fuerza<sup>4</sup> contraelectromotriz.

2. Aceleración por contactor de cierre o relevador en serie.

1.8.8 Aceleración por retardo de tiempo.- Este es del tiempo de finido, del tipo período de control de tiempo. Una vez que se ajusta el período de control de tiempo, no cambia, independientemente de los cambios de corriente o voltaje que se encuentren con la aceleración del motor.

Los siguientes tipos de control de tiempo se emplean para la aceleración del motor; algunos también se utilizan en los métodos de interconexión de los sistemas de control automático:

1. Relevadores de amortiguador individual.

2. Relevadores de amortiguador de circuito múltiple.

3. Control neumático de tiempo.

4. Aceleración de límite de tiempo inductivo.

5. Controles de tiempo impulsados por motor.

6. Control de tiempo por condensador.

CONTROL CONVENCIONAL  
(Motores en Derivación)

2.1 Características de Funcionamiento.- Las curvas características de un motor representan cómo varían el par y la velocidad con la corriente del inducido. Estas curvas se pueden dibujar fácilmente a partir de las ecuaciones:

$$\text{Par producido} = K_t \phi I_a \quad (2-1)$$

$$\text{rpm} = \frac{E_t - I_a R_a}{k \phi} \quad (2-2)$$

siendo:

$E_t$  = la tensión aplicada, en voltios;

$I_a$  = la corriente en el inducido en amperios;

$R_a$  = la resistencia del inducido en ohmios;

$I_a R_a$  = la caída de potencial en la resistencia del inducido - que rara vez excede del 5% de  $E_t$  cuando el motor trabaja a plena carga;

$\phi$  = el flujo por polo;

$k$  y  $K_t$  = constantes

En el caso de un motor en derivación (véase la Fig. 2-1), - la tensión aplicada  $E_t$  y la corriente de excitación  $I_f$  son constantes, como también el flujo por polo, si despreciamos el efecto de la reacción de inducido; en este caso se tiene:

Par motor producido =  $K_t \phi I_a = \text{constante} \times I_a$ ,  
 que es la ecuación de una recta que pasa por el origen. Por otra parte,

$$\text{rpm} = \frac{(E_t - I_a R_a)}{k\phi} = \text{una constante} \times (E_t - I_a R_a)$$

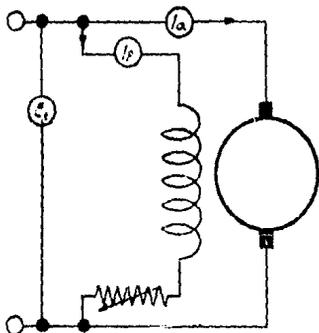


Fig. 2-1 SON CONSTANTES

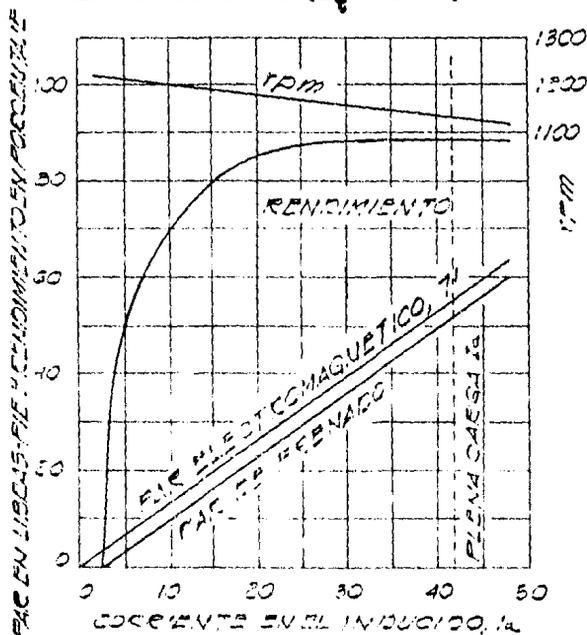


Fig. 2-1 Curvas características de un motor en derivación de 10 HP a 220V.

Las curvas que corresponden a estas ecuaciones están representadas en la figura 2-1. El par proporcionado a la carga mecánica, llamado generalmente par de frenado, es menor que el par electromagnético, siendo la diferencia igual al par resistente producido por el rozamiento en los cojinetes y en las escobillas, las pérdidas en el hierro y la resistencia del aire. La disminución de la velocidad cuando aumenta la carga es debida a que  $E_c$  ha de disminuir para que pueda circular una corriente a-

dicional. Las curvas características representadas en la figura 2-1 pueden obtenerse experimentalmente aplicando distintos pares de frenado y midiendo para cada uno de ellos la velocidad y la corriente en el inducido.

## 2.2 Regulación de la Velocidad en los Motores en Derivación.---

El motor en derivación se denomina motor de velocidad constante porque su velocidad varía sólo ligeramente con la carga. Sin embargo, su característica más estimable es la de ser también un motor de velocidad regulable, Cuando se le provee de resistencias de control adecuadas, puede proporcionar una regulación de velocidad precisa en un amplio margen; en esto se basa su principal aplicación.

La regulación de velocidad puede estudiarse mejor utilizando la ecuación (2-2):

$$\text{rpm} = \frac{E_t - I_a R_a}{k\phi}$$

Quando el motor se conecta a una línea de tensión constante, como se indica en la figura 2-2, con  $E_t$  igual a la tensión nominal del motor y con el réostato de campo colocado en resistencia cero, girará a una cierta velocidad, que se denomina velocidad de pleno campo o velocidad fundamental. Para obtener velocidades superiores a la correspondiente a pleno campo, puede reducirse el flujo por polo,  $\phi$ , intercalando resistencias en serie con las bobinas de excitación, como se indica en la figura 2-2. Para obtener velocidades inferiores a la de pleno campo, debe disminuirse la tensión  $E_t$  aplicada a los bornes del motor,

siendo el procedimiento más fácil de conseguirlo intercalando resistencias en serie con el inducido, como indica la figura -- 2-3.

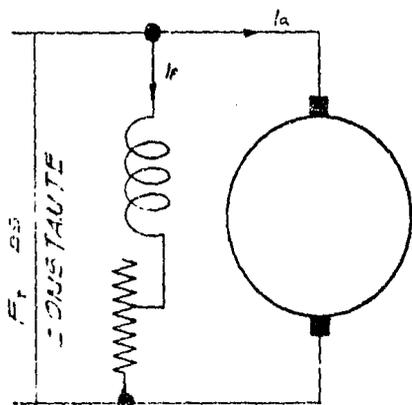


Fig. 2-2 Resistencia intercalada en el circuito de excitación para aumentar la velocidad.

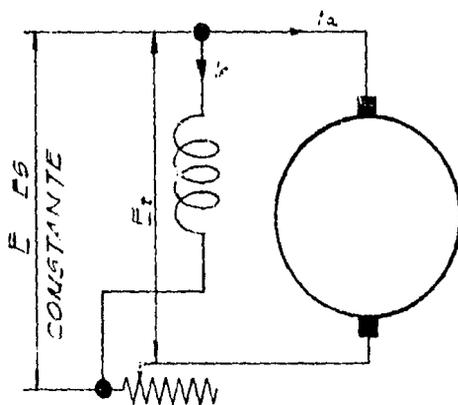


Fig. 2-3 Resistencia intercalada en el circuito del inducido para disminuir la velocidad.

(Métodos para regular la veloc. de un motor en derivación.)

Ambos métodos de regulación de velocidad, si pueden utilizarse en un mismo motor, permiten obtener una variación continua de velocidad desde cero a la velocidad máxima para la cual fue proyectado. En el caso de motores sin polos de conmutación la velocidad máxima queda limitada a 1.7 veces la velocidad de pleno campo, aproximadamente, porque la conmutación resulta deficiente. Esto se debe a que al disminuir  $\beta$  se debilita el flujo en los bordes polares, que cumplen la misión de los polos de conmutación.

2.3 Variación de la Velocidad en los Motores en Derivación Mediante Control del Campo de Excitación.- Intercalando resistencia en el circuito de excitación de un motor en derivación, como indica la figura 2-2, disminuye la corriente excitadora  $I_f$  y por consiguiente, disminuye también el flujo  $\phi$ ; en consecuencia de acuerdo con la ecuación de la velocidad,

$$\text{rpm} = \frac{E_t - I_a R_a}{k\phi} \quad (2-2)$$

el motor en derivación girará más de prisa.

Aunque la fórmula indica que la velocidad aumenta cuando el flujo disminuye, es aconsejable estudiar con más detalle como se verifica esto. Si se reduce bruscamente el flujo por polo descende la fuerza contraelectromotriz del motor y deja que circule más corriente por el inducido. El aumento de corriente en el inducido es mucho mayor que la disminución de flujo, de modo que el par motor es mayor que el necesario para la carga y el motor se acelera.

2.4 Variación de la Velocidad de un Motor en Derivación Mediante Control de la Resistencia del Inducido.- Puede hacerse disminuir la velocidad de un motor en derivación disminuyendo la tensión aplicada a los bornes del mismo. Esto se puede conseguir conectando una resistencia en el circuito del inducido, como indica la figura 2-4.

La velocidad está dada por la fórmula

$$\text{rpm} = \frac{E_t - I_a R_a}{k\phi} \quad (2-2)$$

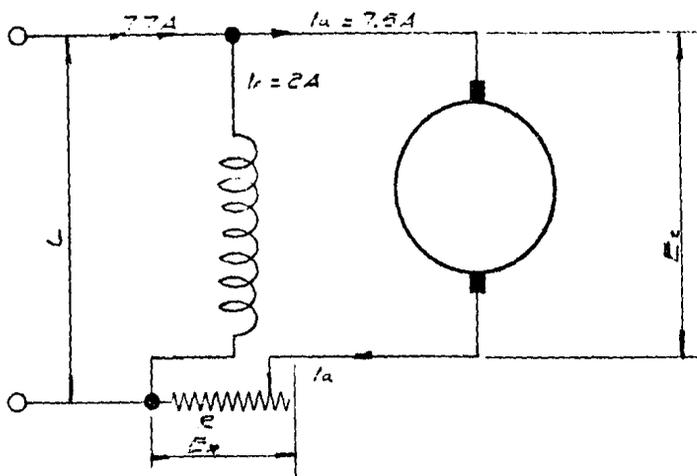


Fig. 2-4 Una resistencia intercalada en el circuito del inducido ocasiona una disminución de velocidad.

en la cual  $I_a R_a$  rara vez excede del 5% de  $E_t$ , de modo que para obtener una velocidad mitad, la tensión aplicada,  $E_t$ , se ha de reducir aproximadamente al 50% de la normal, siendo absorbido el otro 50% de la tensión de la línea por la resistencia intercalada en el circuito; en estas condiciones, la pérdida en la resistencia, que es igual a  $E R I_a$ , es también igual a la potencia  $E_t I_a$  suministrada al inducido, y el rendimiento del sistema es inferior al 50%.

Cuando la velocidad de un motor varía mucho con los cambios de carga, se dice que la regulación es deficiente, mientras que si la velocidad es prácticamente constante para todas las cargas, diremos que la regulación es buena.

La regulación de velocidad de un motor de corriente continua es la variación de la velocidad cuando la carga se reduce -

gradualmente desde la carga total nominal a cero, permaneciendo constante la tensión de la línea y la posición del reóstato de campo.

Supongamos que la velocidad de un motor en derivación se ajusta por medio de una resistencia colocada en el circuito del inducido, como indica la figura 2-4, para que dé una velocidad determinada con una carga fija. Entonces, si aumenta la carga, -- la corriente en el inducido  $I_a$  y la tensión  $E_R$  aumentarán y, -- por consiguiente, la tensión  $E_t$  disminuirá y la velocidad del motor descenderá. En consecuencia, la regulación de velocidad es deficiente cuando se utiliza control de resistencia en el inducido.

Cuando la velocidad de un motor en derivación se regula -- por medio de una resistencia colocada en el circuito de excitación, como indica la figura 2-2, la regulación de velocidad es buena. La velocidad está dada por la ecuación (2-2)

$$\text{rpm} = \frac{E_t - I_a R_a}{k\phi}$$

de modo que siendo  $E_t$  constante, como asimismo el flujo  $\phi$ , una vez que se ha fijado la resistencia de campo, la disminución de velocidad entre vacío y plena carga rara vez excede del 5%, --- puesto que  $I_a R_a$  a plena carga excede rara vez del 5% de  $E_t$ .

2.5 Comparación entre la Regulación de la Velocidad por Control de Resistencia de Inducido y por Control del Campo de Excita---

ción.- El control del campo de excitación de los motores en derivación da velocidades definidas que son aproximadamente independientes de la carga, y todos los cambios de velocidad se efectúan sin disminuir el rendimiento. Como contrapartida, este método queda limitado a las velocidades que son superiores a la velocidad fundamental que se obtiene con pleno campo. Dentro de este margen de velocidades, proporciona una regulación que es prácticamente ideal.

La regulación mediante control de la resistencia de inducido es inferior a la anterior, porque reduce el rendimiento del motor en la misma proporción en que disminuye la velocidad. Esto limita grandemente su posibilidad de aplicación y hace que, en general, se emplee solamente para reducciones de velocidad durante corto tiempo, excepto en el caso de pequeños motores, en los cuales la cantidad de energía que interviene no es importante.

Otro aspecto desfavorable de la regulación por control de la resistencia de inducido es que ninguna posición del reóstato corresponde a una velocidad definida, pues dicha velocidad queda determinada tanto por la carga como por la resistencia de control. Esto puede o no constituir una objeción en una aplicación determinada. Como contrapartida, el control de la resistencia del inducido proporciona un margen de velocidades posibles que no puede alcanzar el control de campo; a saber, el comprendido entre cero y la velocidad de pleno campo, por lo que es un método de regulación de velocidad importante y valioso.

Las limitaciones del método de regulación de velocidad por resistencia en el inducido han traído como consecuencia la uti-

lización de otros métodos para reducir  $E_t$ . Uno de los más importantes es el Sistema Ward Leonard de regulación de velocidad.

2.6 Sistema Ward Leonard de Regulación de Velocidad.- Un método muy eficaz para obtener un amplio margen de velocidades sin utilizar resistencia de inducido, con sus consiguientes desventajas, es utilizar una dinamo independiente para accionar el motor de velocidad regulable y variar la excitación de la dinamo de modo que se modifique la tensión aplicada a los bornes del motor. Este sistema está representado esquemáticamente en la figura 2-5. El equipo se compone del motor  $M_1$ , cuya velocidad ha de regularse, y de un grupo motor-generador de velocidad elevada compuesto de las tres unidades M, G y E, montadas las tres sobre el mismo eje. G es una dinamo con excitación independiente que acciona al motor  $M_1$ , E es una pequeña dinamo autoexcitable, denominada excitatriz, que proporciona la corriente de excitación tanto para la dinamo como para el motor  $M_1$ , y M es el motor que acciona las dinamos G y E. En la práctica, M es generalmente un motor de corriente alterna de velocidad constante, aunque a veces es un motor Diesel o un motor de corriente continua cuando es de esta clase la corriente de la red, en cuyo caso puede suprimirse la excitatriz E y utilizar dicha corriente de la red para la excitación de G y  $M_1$ .

El grupo motor-generador gira a velocidad aproximadamente constante, por estar accionado por un motor de velocidad constante y, por consiguiente, la tensión engendrada por la excitatriz E, las corrientes de excitación, la tensión  $E_t$  y la veloci

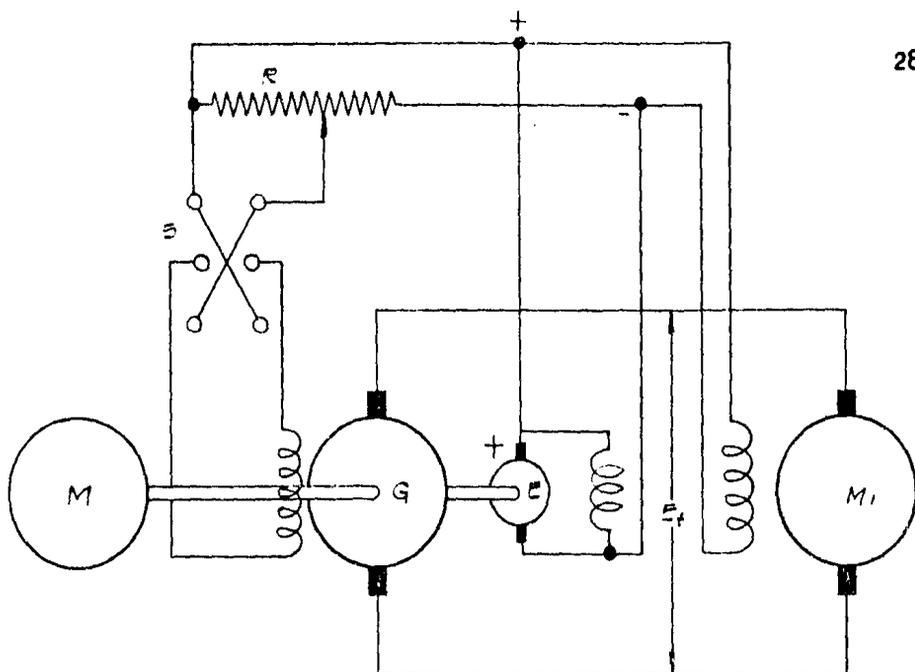


Fig. 2-5 Control de Velocidad por el sistema Ward Leonard.

dad del motor  $M_1$  son todas constantes mientras no se haga nin-  
 gún cambio en el reóstato  $R$ . La velocidad del motor  $M_1$  puede a-  
 justarse a cualquier valor, desde cero hasta un valor máximo, -  
 en uno u otro sentido, por medio del reóstato potenciómétrico  $R$   
 y el conmutador inversor  $S$ . Cada posición del contacto deslisan-  
 te del reóstato da una velocidad determinada al motor  $M_1$ , y es-  
 ta velocidad cambia casi con la misma rapidez con que se mueve-  
 el contacto; es decir, la respuesta es casi instantánea. Así, -  
 por ejemplo, en un caso de aplicación de este tipo de regula-  
 ción de velocidad, un motor de 100 HP accionando una cizalla pa-  
 ra cortar láminas de acero se acelera hasta alcanzar la veloci-  
 dad máxima de 450 rpm, hace el corte y se detiene, en un tiempo  
 total inferior a un segundo. Aún en el caso de los motores de -  
 2000 y 7000 HP, utilizados para accionar trenes reversibles de-  
 laminar acero, por este método se pasa de la velocidad máxima -  
 en un sentido a la misma velocidad en sentido opuesto en un ---

tiempo que varía entre tres y cinco segundos.

Cuando el contacto deslizante del reóstato R se encuentra en el extremo de la derecha, el motor  $M_1$  gira a velocidad máxima. Para invertir la rotación del motor sólo es necesario deslizar el contacto móvil de R hasta el extremo de la izquierda, invertir el conmutador S y después mover el contacto deslizante - nuevamente hacia la derecha.

La razón de que la velocidad del motor responda tan rápidamente a cualquier cambio en la posición del reóstato, se comprende mejor considerando la ecuación que da la corriente en el inducido:

$$I_a = \frac{E_t - E_c}{R_a} \quad (2-3)$$

Ahora bien;  $R_a$  es pequeña y en funcionamiento normal  $E_t$  y  $E_c$  son aproximadamente iguales; en consecuencia, si  $E_t$  se duplica de pronto, deslizando el contacto móvil hacia la derecha,  $I_a$  se hace muy grande, el par motor ( $K_t \phi I_a$ ) también crece mucho y el motor acelera muy rápidamente. De forma análoga, si  $E_t$  se reduce repentinamente a la mitad, deslizando el contacto del reóstato hacia la izquierda,  $I_a$  se invierte, originando un gran par negativo. Como consecuencia, el motor desacelera muy rápidamente hasta que  $E_c$  es de nuevo inferior a  $E_t$ . Durante este período momentáneo de inversión de  $I_a$ , el motor  $M_1$  funciona realmente - como dinamo y transforma la energía cinética de rotación en energía eléctrica. La dinamo G se convierte en motor y empuja al motor M, obligándole a convertirse en un generador, de este modo la energía cinética de rotación del motor  $M_1$  es devuelta a la red de alimentación.

## 2.7 APLICACIONES DEL SISTEMA WARD LEONARD DE REGULACION DE VELOCIDAD

Este tipo de control de velocidad tiene un costo elevado - de instalación, puesto que se requieren tres máquinas para hacer el trabajo de una. El motor  $M$  transforma la energía eléctrica recibida de la línea (no representada) en energía mecánica, - que es transmitida por el eje a la dinamo  $G$ . Esta dinamo transforma de nuevo la energía mecánica en eléctrica y el motor  $M_1$  - convierte finalmente la energía eléctrica en mecánica. Además, - cada máquina disipa del 5 al 8% de la energía en este proceso. - No obstante, hay muchas aplicaciones en las cuales la calidad - del servicio es de suprema importancia y el costo de instala- - ción es un factor relativamente secundario.

El sistema Ward Leonard de regulación de velocidad, con -- distintas modificaciones de menor importancia, se utiliza am- - pliamente. Su principal aplicación es en las fábricas siderúrgi- cas para accionar trenes reversibles de laminación, obtener tu- bos sin soldadura e impulsar cizallas; para accionar ascensores de velocidad media y elevada en grandes edificios, malacates de minas y para mover máquinas de fabricar papel. Las locomotoras- eléctricas del Gran Ferrocarril del Norte, en Estados Unidos, - funcionan por el sistema Ward Leonard, así como las excavadoras mecánicas y volquetes de vagones. La delicada regulación de ve- locidad necesaria para el funcionamiento de las torres de caño- nes en los barcos de guerra se consigue por el sistema Ward Leo- nard; existen, además, otras numerosas aplicaciones.

## ELECTRONICA BASICA

3.1 Teoría del Diodo Semiconductor.- Actualmente el material básico utilizado en la fabricación de la mayor parte de diodos y transistores es el silicio. El silicio es un semiconductor; a temperatura ambiente existen en la banda de conducción de un cristal de silicio muy pocos electrones. Como la corriente es proporcional al número de electrones en movimiento, la corriente es pequeña; por lo tanto el material tiene una elevada resistencia.

A  $0^{\circ}\text{K}$  (cero absoluto) todos los electrones están en los niveles de energía más bajos. A temperatura ambiente algún electrón tiene ocasionalmente la suficiente energía para escapar de la banda de valencia a la banda de conducción, como se indica en la figura 3-1.

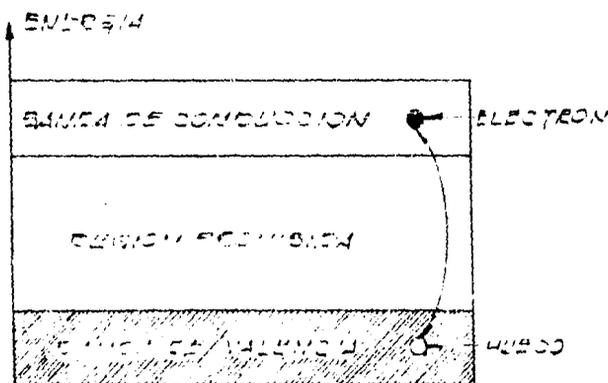


Fig. 3-1 Bandas de energía del silicio a temperatura ambiente

El diodo consiste en la combinación de un material tipo p- y un tipo n, unidos tal como se indica en la figura 3-2. La unión entre los materiales tipo p y n es la base del diodo de unión; la figura 3-2a muestra un diodo polarizado directamente y su símbolo, los huecos de la región p fluyen hacia la región n- mientras que los electrones de la región n fluyen hacia la región p. Una pequeña tensión  $V$  es suficiente para producir una corriente elevada.

La figura 3-2b muestra un diodo polarizado en sentido inverso. Los electrones de la región p fluyen hacia la región n, mientras que los huecos de la región n fluyen a la región p; la circulación de corriente es pequeña.

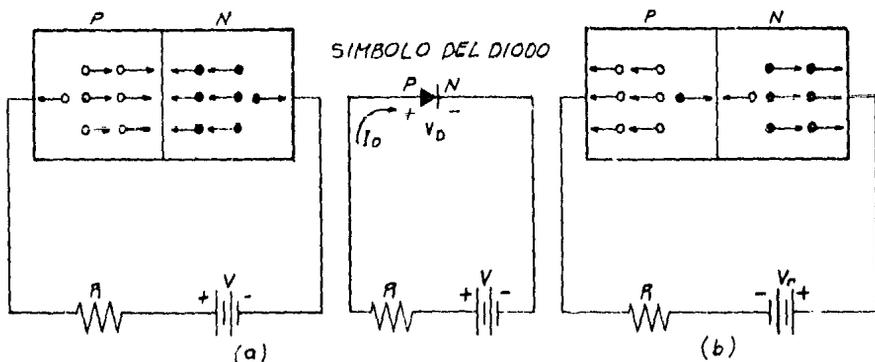


Fig. 3-2 El diodo de unión. a) Polarización directa, b) Polarización inversa.

El proceso de ruptura en avalancha puede considerarse como un electrón móvil que choca con un electrón fijo, dejándolo libre, estos dos electrones liberan a otros dos, etc., ello da lugar a un gran flujo de corriente en esta región.

Los diodos reales tienen características y limitaciones -- que hacen que difieran del diodo ideal. La figura 3-3 muestra -- las curvas características reales de los diodos de germanio y -- silicio.

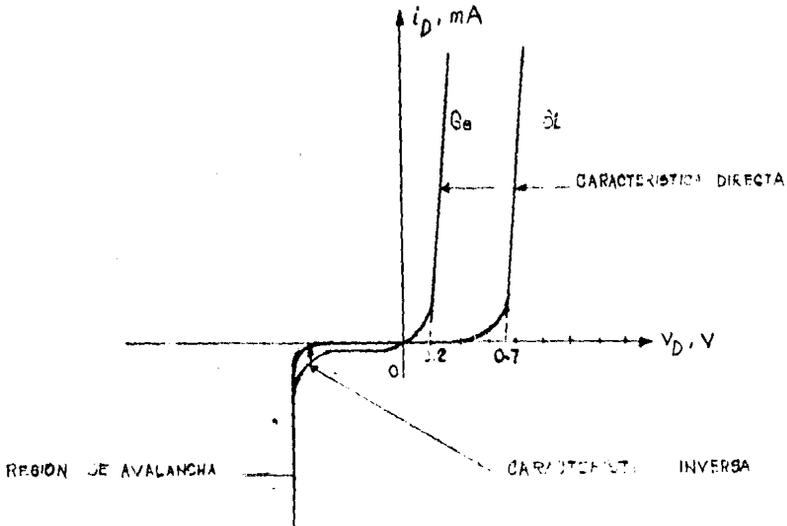


Fig. 3-3 Características reales del diodo de unión.

El diodo rectificador.- Las características proporcionadas por los fabricantes normalmente son las siguientes:

Tipo: Diodo de silicio 1N566 (los valores serán para 25°0)

- 1.- Tensión inversa de cresta (PIV) = -400 V
- 2.- Máxima corriente inversa  $I_o$  (para la tensión PIV) = 1.55A
- 3.- Máxima tensión continua directa = 1.2 V para 500 mA
- 4.- Corriente directa media rectificada en media onda ( $I_F = 1.5$  A)
- 5.- Temperatura máxima de la unión  $T_j$ , = 175°0
- 6.- Curva del factor de reducción de la potencia nominal dada

Las características de operación en inversa se explican fácilmente en los incisos siguientes:

- a).- La tensión inversa de cresta (PIV) es la tensión negativa-máxima admisible que puede aplicarse al diodo antes de la ruptura.
- b).- La corriente inversa máxima de saturación  $I_0$  para esta tensión es 1.5 A. Así, cuando el diodo se utilice en un circuito -rectificador, la corriente negativa máxima a través de él será de 1.5 A.
- c).- Si el diodo es atravesado por una corriente continua de -- 500 mA, la caída de tensión máxima en él será de 1.2 V.
- d).- La temperatura ambiente debe ser menor de  $60^{\circ}\text{C}$ .

Para temperaturas mayores de  $60^{\circ}\text{C}$  la corriente inversa máxima (1.5A) debe reducirse linealmente hasta que la temperatura ambiente sea la misma que la máxima de la unión de  $175^{\circ}\text{C}$ , en cuyo punto  $I_p = 0$ . Cuando se proyectan circuitos con diodos, un buen método es utilizar un factor de seguridad del 15% al 25% - en todos los valores nominales dados, para tener en cuenta la - dispersión de las características de los diodos individuales.

El circuito rectificador puede construirse de varios diodos, dependiendo de la respuesta deseada; generalmente se utiliza el rectificador de cuatro diodos (rectificador de onda completa).

### 3.2 TRANSISTORES

El transistor de unión.- Un transistor de unión consiste - en un cristal de silicio (o germanio) en el que una capa de si-

licio tipo n está colocada entre dos capas de silicio tipo p. - Un transistor también puede estar constituido por dos capas de material tipo n que encierran una capa de semiconductor tipo p. En el primer caso, el transistor se define como transistor --- p-n-p y en el segundo como n-p-n, los dos tipos de transistores están representados en la figura 3-4. En la figura 3-4a se indican las representaciones esquemáticas empleadas para el caso de que los transistores se empleen como elementos de un circuito. Las tres partes del transistor se conocen con los nombres de emisor, base y colector. La flecha del emisor indica la dirección de la corriente cuando la unión emisor-base está polarizada en sentido directo. Los símbolos  $V_{EB}$ ,  $V_{CB}$  y  $V_{CE}$  representan las tensiones emisor-base, colector-base y colector-emisor, respectivamente, (en forma más específica,  $V_{EB}$  representa la caída de potencial desde el emisor a la base).

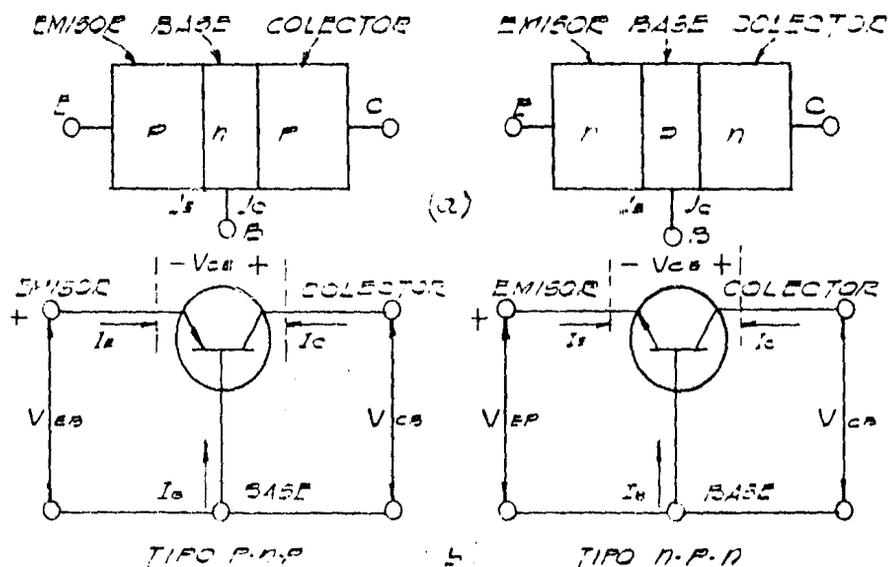


Fig. 3-4 a).- Un transistor p-n-p y uno n-p-n. b).- Circuito de los dos tipos de transistores.

3.2.1 El transistor en circuito abierto.- Si no se aplica ninguna tensión de polarización, todas las corrientes del transistor deben ser nulas. Las barreras de potencial de las uniones se ajustan a la diferencia de potencial de contactos  $V_0$ , requerida para que ningún portador libre atravesase la unión. Si suponemos una unión completamente simétrica (las regiones del emisor y del colector con idénticas dimensiones físicas y concentración de impurezas) las alturas de las barreras son idénticas para la unión de emisor  $J_E$  y para la unión de colector  $J_C$ .

3.2.2 Características de salida.- Con la unión del colector polarizada en sentido inverso y la unión del emisor en sentido directo, la región activa corresponde al área a la derecha de la ordenada  $I_C$  (figura 3-5) por encima de  $I_b = 0$ ; en esta región, la corriente de salida del transistor responde más sensiblemente a la señal de entrada. Si el transistor se quiere emplear como amplificador sin apreciable distorsión debe limitarse a trabajar en esta región.

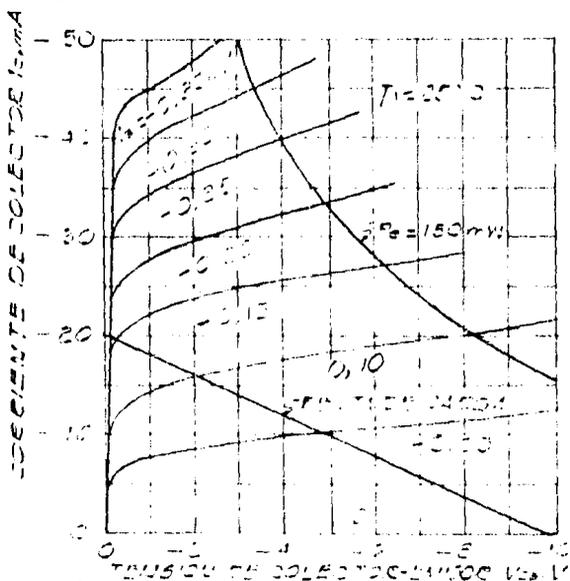


Fig. 3-5 Características de salida de un transistor p-n-p.

Aplicando las leyes de Kirchhoff de las corrientes a un -- transistor emisor común, la corriente de base es:

$$I_b = -(I_c + I_e) \quad (3-1)$$

combinando esta ecuación con:

$$I_e = - \frac{I_c - I_{co}}{\alpha} \quad (3-2)$$

(en la que  $I_{co}$  = corriente de saturación del diodo polarizado - en inversa)

encontramos:

$$I_c = \frac{I_{co}}{1 - \alpha} + \frac{I_b}{1 - \alpha} \quad (3-3)$$

como:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (3-4)$$

$I_c$  se transforma en:

$$I_c = \frac{\beta I_{co}}{\alpha} + \beta I_b \quad (3-5)$$

3.2.3 El transistor en la región de corte en emisor común.- Podemos inclinarnos a creer que la región de corte está en la intersección de la línea de carga con la corriente  $I_b = 0$ , no obstante puede existir una corriente apreciable de colector en estas condiciones; de las ecs. (3-1) y (3-3) si  $I_b = 0$ , tendremos  $I_e = -I_c$  y:

$$I_c = -I_e = \frac{\beta I_{co}}{1 - \alpha} = I_{ceo} \quad (3-6)$$

La corriente real de colector con su unión polarizada en sentido inverso y la base en circuito abierto, se designa como  $I_{co}$ ; como en las cercanías del corte puede ser de 0.9 para el germanio, entonces  $I_c \approx 10 I_{co}$  para una corriente de base nula. Por tanto, para cortar un transistor, no es suficiente que  $I_b = 0$ , sino que además es preciso que la unión de emisor está ligeramente polarizada en inversa. Definiremos el corte como la condición en que la corriente de colector es igual a la corriente inversa de saturación.

3.2.4 Región de saturación de emisor común.- En la región de saturación, la unión de colector (así como la unión de emisor) está polarizada en directa, por lo menos a la tensión umbral. Como la tensión  $V_{BE}$  ( $V_{BC}$ ) en una unión polarizada en directa tiene un valor de sólo unas décimas de volt,  $V_{CE} = V_{BE} - V_{BC}$  es también de sólo algunas décimas de volt en saturación. Por lo tanto, en la figura 3-5 la región de saturación está muy cerca del eje de tensión nula, donde todas las curvas se unen y caen rápidamente hacia el origen; en la región de saturación la corriente de colector es casi independiente de la corriente de base, para unos valores dados de  $V_{CC}$  y de  $R_L$ ; por tanto, podemos considerar que el punto de partida de la saturación está ubicado en el codo de las curvas del transistor.

3.2.5 El Transistor en Conmutación.- Un interruptor ideal cuando está cerrado presentará una impedancia nula y una caída de tensión en bornes también nula; el transistor en saturación tiene característica de saturación resistiva, que es  $V_{CE}(\text{sat})$  que depende de la corriente que circula y de la temperatura de trabajo. Cuando la corriente de base es nula el transistor trabaja en el estado de bloqueo, en dichas condiciones la impedancia al

pase de la corriente es elevada y sólo circula corriente de fuga. Desde el instante en que se da la orden de conmutación a un transistor, hasta que éste conmuta, transcurre un tiempo que depende de las características del circuito que se conmuta ya que la forma en que realiza la conmutación varía en función de la línea de carga de la figura 3-6; se observa la línea de carga resistiva así como los puntos a, b, de conmutación.

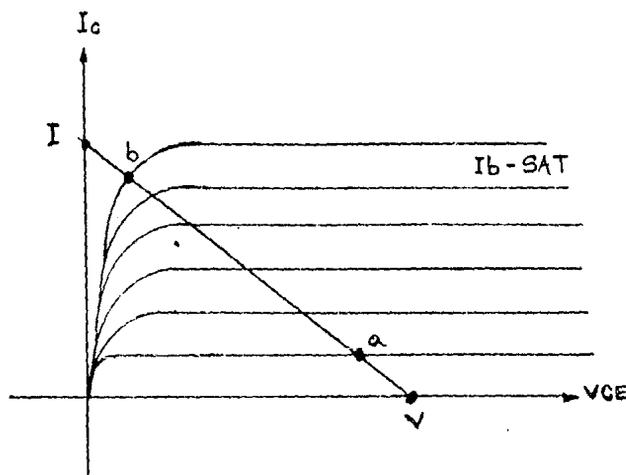


Fig. 3-6 Puntos de conmutación en la línea de carga de un transistor.

### 3.3 TIRISTORES

El tiristor presenta sobre el antiguo tiratrón una serie de ventajas debidas precisamente al hecho de que constituye un elemento de estado sólido: innecesidad de precalentamiento, vo-

lumen reducido, fuerte resistencia a los choques y aceleraciones, posibilidad de trabajo en todas las posiciones, fiabilidad vida media muy larga, velocidad elevada de conmutación y caída de tensión directa muy baja.

El tiristor es un semiconductor sólido de silicio formado por cuatro capas P y N alternativamente, dispuestas como se ven en la figura 3-7, donde también se representa su símbolo.

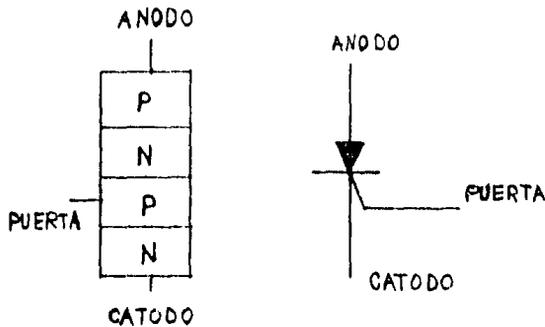


Fig. 3-7 Estructura y símbolo del tiristor.

Los dos terminales principales son el ánodo y el cátodo y la circulación entre ellos de corriente directa (electrones que van del cátodo al ánodo o corriente que va de ánodo a cátodo) - está controlada por un electrodo de mando llamado puerta.

El tiristor o SGR (silicon controlled rectifier) es un elemento unidireccional; una vez aplicada la señal de mando a la - puerta, el dispositivo deja pasar una corriente que sólo puede tener un único sentido.

El tiristor bajo tensión, en estado de bloqueo, con cátodo

a masa y puerta no conectada (flotando) se puede comparar a --- tres diodos conectados en oposición (figura 3-8); en efecto, -- las capas  $P_2N_2$  y  $P_1N_2$  forman diodos que aseguran el aguante en-tensión del dispositivo, de esta forma:

Si el ánodo es positivo, el elemento está polarizado direc-tamente, pero el diodo  $P_1N_2$  bloquea la tensión aplicada.

Si, por el contrario, el ánodo es negativo, los diodos ---  $P_2N_2$  y  $P_1N_1$  tienen polarización inversa. Por ser débil la ten-sión de avalancha de  $P_1N_1$ , su papel es despreciable y es  $P_2N_2$  - el que ha de limitar la corriente inversa de fuga.

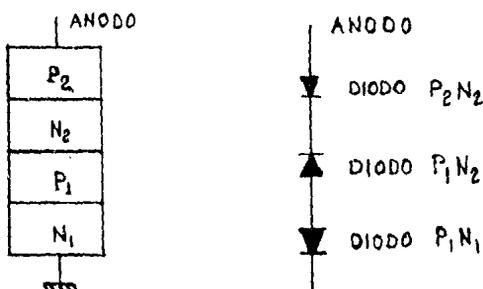


Fig. 3-8 Las tres uniones del tiristor pueden representarse con tres diodos equivalentes.

La tensión máxima viene limitada, prácticamente, por la ten-sión de avalancha de los diodos  $P_2N_2$  y  $P_1N_2$ .

3.3.1 El Tiristor bajo Tensión Directa.- Se comprenderá mejor - el funcionamiento del tiristor si nos referimos al montaje con-dos transistores, PNP y NPN, como se muestra en la figura 3-9,- que resulta equivalente; estos dos transistores están conecta-

dos de forma que se obtenga una realimentación positiva.

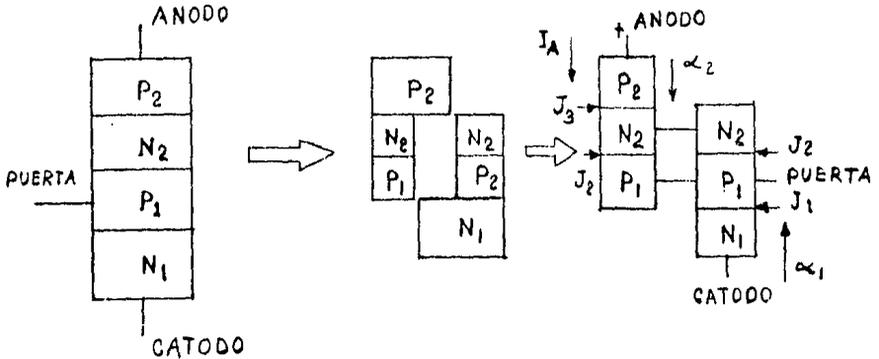


Fig. 3-9 El tiristor equivalente a dos transistores PNP y NPN.

Supongamos que sea positiva la región  $P_2$  con relación a la  $N_1$ . Las uniones  $J_3$  y  $J_1$  emiten portadores, positivos y negativos, respectivamente, hacia las regiones  $N_2$  y  $P_2$ . Estos portadores, tras su difusión en las bases de los transistores, llegan a la unión  $J_2$ , donde la carga espacial crea un intenso campo eléctrico.

Siendo  $\alpha_2$  la ganancia de corriente que da la fracción de la corriente de huecos inyectada en el emisor y que llega al colector del NPN, podemos escribir:

$$I_{c_2} = \alpha_1 I_a$$

$$I_{c_1} = \alpha_2 I_a$$

La corriente total de ánodo  $I_a$  es, evidentemente, la suma de  $I_{c_1}$  e  $I_{c_2}$  a la que hay que sumar la corriente de fuga residual que pasa por la unión central  $J_2$  y a la que llamaremos  $I_{ox}$ . Se tiene entonces:

$$I_a = \alpha_1 I_a + \alpha_2 I_a + I_{ox}$$

lo que nos da:

$$I_a = \frac{I_{ox}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Ahora bien, en muchos transistores de silicio la ganancia es baja para valores reducidos de corriente, aumentando cuando crece la corriente. Luego si  $I_{ox}$  es reducida, el denominador de la fracción anterior se acerca a 1 (para corrientes débiles) y la corriente  $I_a$  es apenas mayor que la corriente de fuga; aunque polarizada directamente, la estructura PNPN permanece bloqueada, presentando una elevada impedancia.

Cuando aumenta por cualquier motivo la corriente de fuga  $I_{ox}$ , aumenta la corriente y la ganancia. La suma  $\alpha_1 + \alpha_2$  tiende entonces a 1 y la corriente  $I_a$  tiende a infinito. En realidad, esta corriente toma un valor muy alto, limitada sólo por el circuito externo. El tiristor está entonces en estado conductor (también se dice que está desbloqueado o disparado).

Hay que notar que este tipo de accionamiento, por aumento de la corriente de fuga, esto es, en general, por aumento de la tensión aplicada entre ánodo y cátodo del elemento es desaconsejable en la mayoría de los casos.

3.3.2 Principio de accionamiento por puerta.- El accionamiento por puerta es el método más usual de disparo de tiristores. Refiriéndonos a la figura 3-10, una vez polarizado el tiristor se inyecta un impulso positivo de mando en su puerta (este ataque-

es en corriente, denominándose  $I_G$  a esta última). El transistor NPN, designado  $T_1$ , recibe una corriente de base  $I_G$ , pasando a ser su corriente de colector  $I_G \beta_1$ , donde  $\beta_1$  es la ganancia de corriente de este transistor (montaje en emisor común). Esta corriente se inyecta, a su vez, en la base del transistor  $T_2$  (PNP) que entrega entonces una corriente de  $I_G \beta_1 \beta_2$  (siendo  $\beta_2$  la ganancia de corriente de  $T_2$ ). La corriente que aparece en el colector de  $T_2$  vuelve a aplicarse a la base de  $T_1$ .

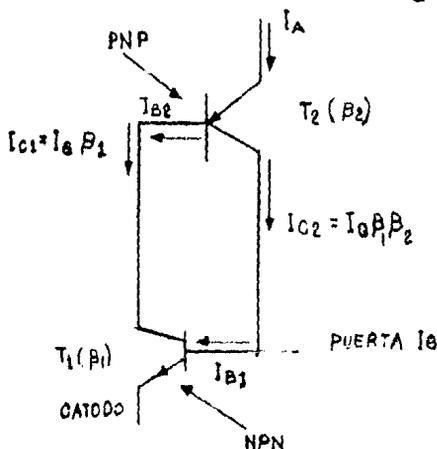


Fig. 3-10 Montaje equivalente de un tiristor que explica el fenómeno del accionamiento por puerta.

Hay que considerar entonces dos casos:

- 1o. El producto  $\beta_1 \beta_2$  es inferior a la unidad, en cuyo caso el elemento no acciona.
- 2o. El producto  $\beta_1 \beta_2$  es mayor a la unidad, con lo que se realiza el proceso de amplificación y el elemento bascula al estado conductor.

Estas dos condiciones ( $\beta_1\beta_2 < 1$  y  $\beta_1\beta_2 > 1$ ) caracterizan - el estado del tiristor en función de la corriente. En efecto, - la ganancia de un transistor de silicio crece normalmente, por lo general, en función de la corriente (figura 3-11). Así:

Si la corriente de puerta es débil, el producto  $\beta_1\beta_2$  es inferior a la unidad y no se acciona el elemento.

Si el impulso de mando es suficiente, las corrientes de emisor son lo bastante elevadas para que el producto  $\beta_1\beta_2$  sea mayor a la unidad.

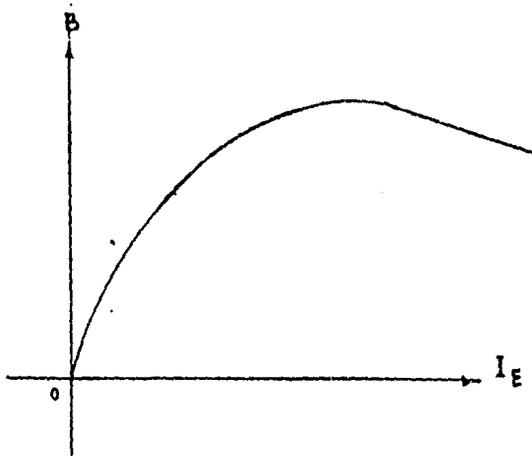


Fig. 3-11 La ganancia de corriente de un transistor de silicio depende, por lo general, de la corriente de emisor.

En cuanto se produce el accionamiento por puerta, la realimentación hace que los dos transistores conduzcan a saturación- (por cuanto la corriente de colector de uno se inyecta sistemáticamente en la base del otro). Una vez en conducción, los tran- sistores se mantienen en estado de conducción, incluso aunque - desaparezca el impulso inicial de puerta, hasta que el circuito exterior deje de mantener la corriente  $I_a$ .

3.3.3 Curva Característica del Tiristor.- En la figura 3-12 se ha dibujado la curva característica de un tiristor (elemento unidireccional), representándose la corriente  $I_a$  en función de la diferencia de tensión ánodo-cátodo.

Cuando es nula la tensión  $V$ , lo es también la corriente --  $I_a$ . Al crecer la tensión  $V$  en sentido directo; se le designará como  $V_F$ , siendo  $F$  la inicial de "forward" (directo), se alcanza un valor mínimo ( $V_d$ ) que provoca el accionamiento; el tiristor se hace entonces conductor y cae la tensión ánodo-cátodo mientras aumenta la corriente  $I_a$ . Por lo mismo que hemos dicho de la tensión, a esta corriente directa la llamaremos  $I_F$ .

Si se polariza inversamente el tiristor, aplicándole una tensión  $V_R$  (donde  $R$  es la inicial de "reverse") se observa la existencia de una débil corriente inversa de fuga (esta corriente inversa recibirá el símbolo  $I_R$ ), hasta que se alcanza un punto de tensión inversa máxima que provoca la destrucción del elemento.

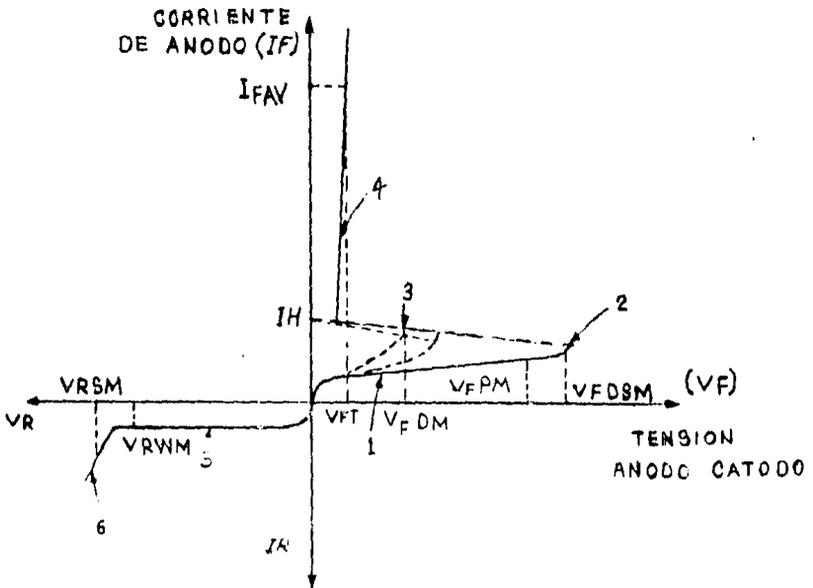


Fig. 3-12 Curva característica de un tiristor.

El tiristor es, pues, conductor sólo en el primer cuadrante. El disparo ha sido provocado en este caso por aumento de la tensión directa.

La aplicación de una corriente de mando en la puerta des--plaza, como se verá más adelante, hacia la izquierda el punto - de disparo  $V_d$ .

A continuación definiremos los símbolos principales relativos a puntos notables de esta curva (Fig. 3-12):

$I_{FAV}$  (Corriente directa media).- Valor medio de los valo--res instantáneos de corriente directa ánodo-cátodo en el tiristor, para un intervalo dado de tiempo.

$I_L$  (Corriente de enganche).- Corriente  $I_a$  mínima que hace-bascular el tiristor del estado de bloqueo al de conducción. Su valor es por lo general de dos o tres veces la corriente de mantenimiento, definida a continuación.

$I_H$  (Corriente de mantenimiento).- Corriente de ánodo,  $I_a$ , -mínima para conservar el estado de conducción del tiristor.

$I_G$  = Corriente de puerta.

$V_d$  (Tensión directa de disparo).- Tensión directa por enci--ma de la cual se acciona el tiristor por disparo directo.

$V_{FDM}$  (Tensión directa de pico en bloqueo, también  $V_{DWM}$ ).-- Valor que fija un límite a la tensión máxima aplicable entre á--nodo y cátodo del tiristor, con puerta flotante, sin riesgo de--disparo.

$V_{RWM}$  (Tensión inversa recurrente).- Valor máximo que puede tomar la amplitud de la tensión inversa periódica aplicada entre el ánodo y cátodo del tiristor.

$V_{RSM}$  (Tensión inversa transitoria o accidental).- Valor -- que limita la tensión inversa cátodo-ánodo a la que puede someterse el tiristor durante un intervalo dado de tiempo.

3.3.4 Acción de la Puerta.- Si se aplica una señal de mando a la puerta del tiristor se modifica la tensión de accionamiento de éste, tal como lo muestran las curvas de la figura 3-13.

Cuando es nula la corriente  $I_G$  de puerta, el tiristor no se acciona hasta que alcanza la tensión de disparo entre ánodo y cátodo del elemento.

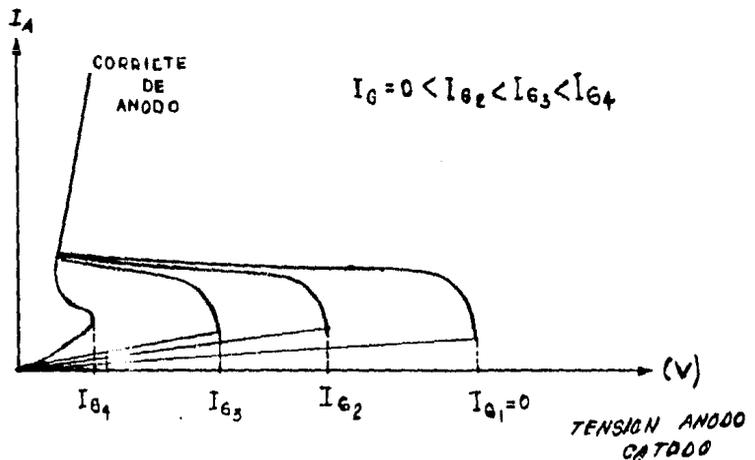


Fig. 3-13 La tensión de retorno  $V_d$  del tiristor en función de la corriente de puerta.

A medida que aumenta la corriente de puerta  $I_G$  disminuye -

el valor de la tensión de disparo del tiristor. En el límite, - el tiristor se comporta como diodo, esto es, para una corriente de puerta suficientemente elevada, la menor tensión de ánodo -- provoca la conducción en el tiristor.

## CONTROL DE POTENCIA MEDIANTE SCR

**Rectificación:** El SCR se utiliza como diodo.

**Comutación:** Consiste en utilizar al SCR como interruptor.

**Regulación:** La posibilidad de ajustar el momento preciso de saturación permite emplear al SCR para gobernar la potencia o la corriente media de salida.

**Amplificación:** Puesto que la corriente de entrada puede ser muy débil en comparación con la corriente principal, observamos un fenómeno de amplificación en corriente o en potencia.

**4.1 Rectificación de Potencia Mediante SCR.**- En los circuitos rectificadores se puede sustituir total o parcialmente a los diodos por SCR, el objetivo es obtener sistemas de rectificación controlada que permitan la regulación del valor medio de la tensión en la carga, en función del ángulo de disparo del SCR. Se utilizan con preferencia los montajes mixtos de SCR y diodo, por razones de economía y simplicidad de las etapas de disparo. Con referencia a los circuitos analizados se sustituyen por SCR todos los diodos.

En muchos casos, cuando no se desea una regulación completa se utiliza la disposición de SCR con cátodo común, ya que permite el ataque de éstos mediante un único generador de impulsos.

En la figura 4-1A se representa un rectificador controlado monofásico de media onda con carga resistiva, las correspondientes formas de onda se indican en la figura 4-1B para un ángulo de conducción dado, derivado de la aplicación de impulso en un ángulo de disparo determinado.

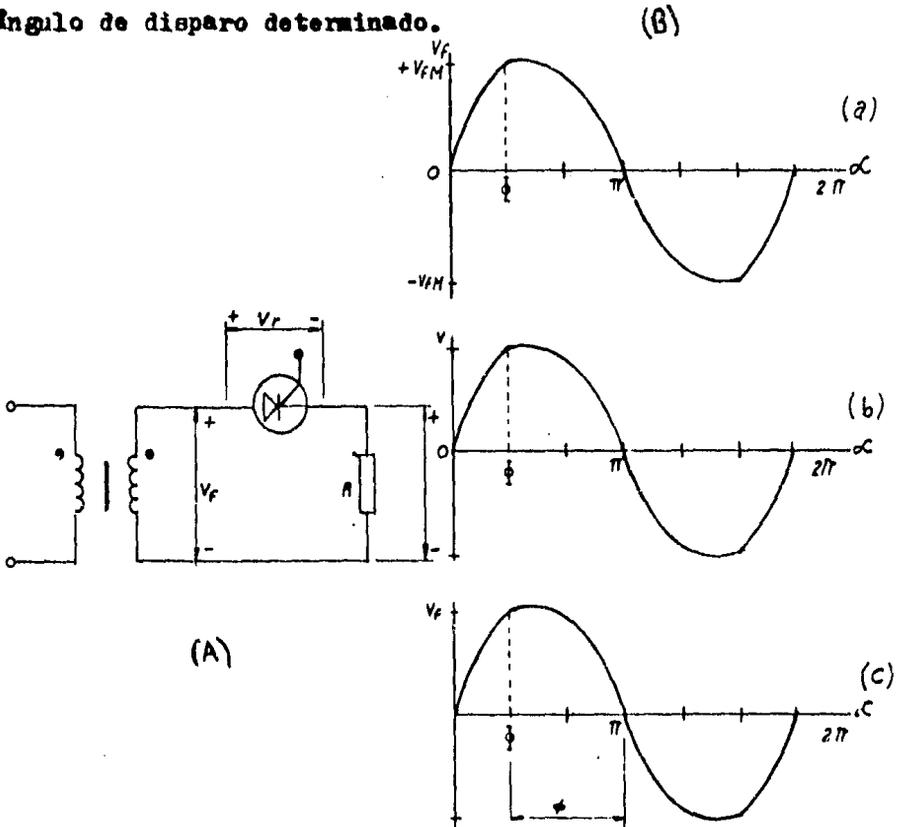


Fig. 4-1 Rectificador controlado monofásico. A) Circuito. B) -- Formas de onda.

Se representa:

- Tensión instantánea en el secundario del transformador
- Tensión instantánea en bornes de la carga, y
- Tensión en extremos del SCR,  $V_t$ .

El sistema de disparo deberá suministrar impulsos con desfase variable respecto a la tensión del transformador y de la frecuencia de éste y podrá regular completamente la tensión de la carga.

4.1.1 Rectificación Trifásica.- La figura 4-2A representa un rectificador trifásico controlado de media onda. La carga puede ser puramente resistiva o puramente inductiva. En la figura ---

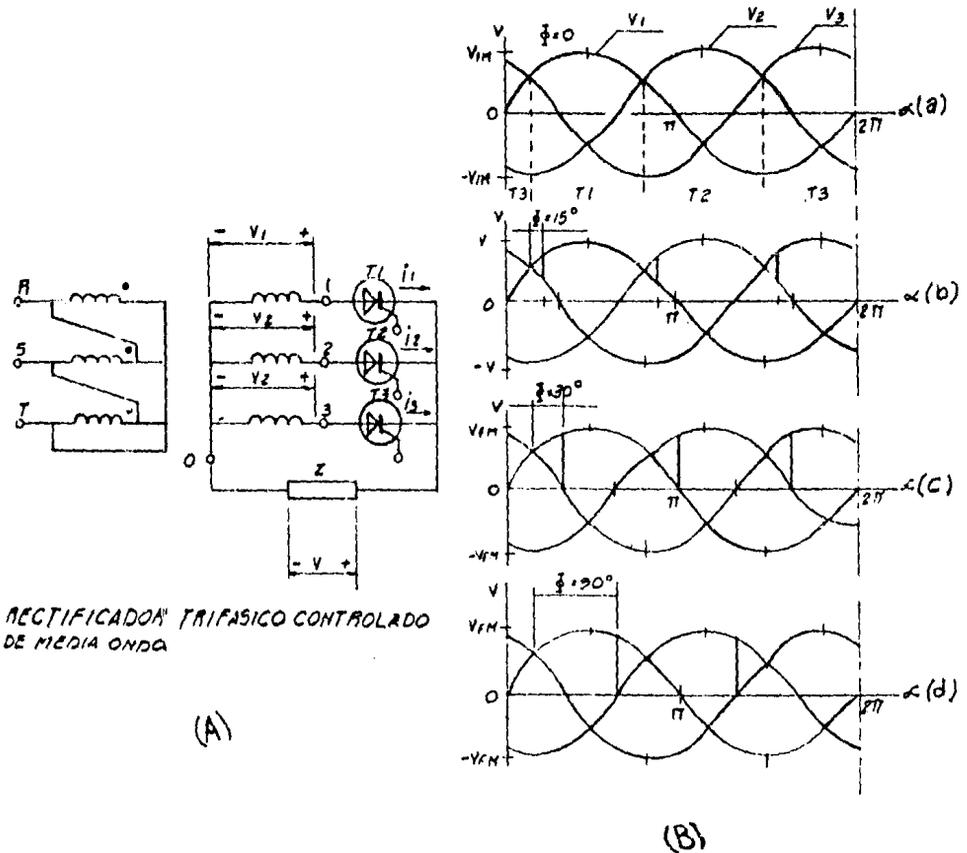


Fig. 4-2 Rectificador trifásico controlado de media onda. A) -- Circuito. B) Formas de onda para diferentes ángulos de disparo.

4-2B se observa la representación del valor instantáneo de la tensión en la carga para distintos ángulos de disparo.

Una ventaja de utilizar SCR, es que obtenemos una fuente de alimentación de c.c. con salida variable, o regulada sin pérdida apreciable de potencia.

#### 4.2 SCR UTILIZADO COMO INTERRUPTOR

Para que el SCR actúe como interruptor se necesita una fuente de poder, una carga, un medio de la señal de disparo a la compuerta para poner en conducción al SCR y otro medio para parar la conducción; hay relaciones y restricciones que se deben cumplir entre la fuente de poder, la carga y la señal de disparo. Esta información se obtiene en las especificaciones dadas por los fabricantes, según el tipo de unidad. La operación del SCR queda estrechamente ligada a la temperatura de trabajo por lo que es necesario el empleo de gráficas de operaciones de acuerdo con la temperatura.

El voltaje que hay que aplicar a un SCR entre cátodo y ánodo sin tener una señal de disparo para ponerlo en conducción es el voltaje directo de disparo. Una unidad que va a interrumpir una fuente de poder de  $V_x$  volts, debe seleccionarse con un voltaje directo de disparo mayor que  $V_x$ , para evitar que la fuente de poder vaya a producir disparos indeseables.

Muchos fabricantes especifican el voltaje directo de bloqueo (voltaje máximo que se puede aplicar al SCR entre ánodo y cátodo sin tener señal de disparo que no pone en conducción al SCR) en lugar del voltaje directo de disparo porque se emplea la misma característica.

### 4.3 REGULACION DE POTENCIA MEDIANTE SCR

La habilidad de los SCR de pasar de un estado de no conducción a uno de conducción, rápidamente, hace posible controlar la potencia suministrada por una fuente de corriente alterna a una carga; este tipo de control puede usarse para variar la velocidad de motores de c.d. y c.a., la luminosidad de lámparas, etc.. Para que el empleo de SCR en circuitos de control de potencia sea más recomendable que dispositivos convencionales como el tiratrón y el diodo zener, la potencia controlada debe ser muy grande con un mínimo de circuito de control.

Cuando un SCR se emplea como un interruptor de una fuente de corriente alterna, la corriente deja de circular cada vez que ésta llega a un valor cero si el SCR es disparado por un pulso al principio de cada ciclo de c.a., de este modo se tendrá en la carga la potencia máxima; en estas condiciones, se dice que la señal de disparo está en fase con el voltaje de la

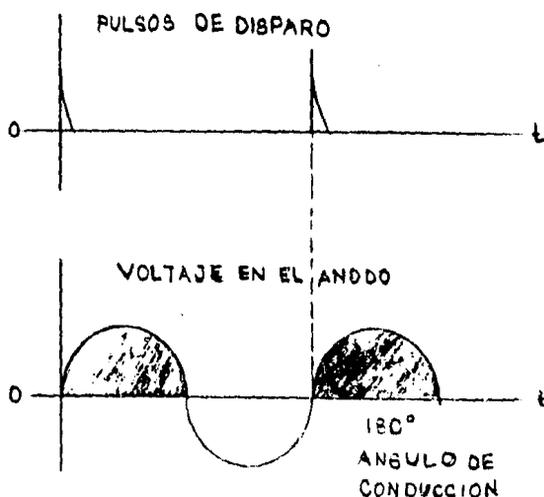


Fig. 4-3 Señal de disparo de control en fase con el voltaje de la fuente a controlar.

fuelle y se tiene un ángulo de conducción de  $180^\circ$  y un ángulo de encendido de cero grados. La representación de esta situación se observa en la figura 4-3.

En la figura 4-3, la gráfica superior da la señal de disparo, que es una serie de impulsos; la naturaleza exacta de los pulsos depende de los voltajes máximos y mínimos, así como de la corriente necesaria según las especificaciones de los diferentes tipos de tiristores. La gráfica inferior de la misma figura muestra la corriente en la carga, el área sombreada es proporcional a la potencia consumida en la carga.

El ángulo de encendido es el número de grados que la onda de voltaje senoidal no se refleja en la carga antes de que se presente el pulso de disparo. El ángulo de conducción representa el tiempo que el SCR está encendido durante medio ciclo. Variando el desfase entre los pulsos de disparo y el voltaje de la fuente se consigue control de potencia desde un valor cero hasta un valor máximo, pasando por valores intermedios.

## CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR DE C.C. MEDIANTE SCR

Es imprescindible conocer relativamente bien el motor de corriente continua para efectuar cualquier regulación y saber como aplicarla. Repasaremos brevemente su comportamiento y constitución adecuada para funcionar con equipos convertidores a tristores.

### 5.1 COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DE C.C.

Existen, como sabemos, distintos tipos de motores de continua, según sea su excitación o inducido y forma de conexión de ambos devanados: motor serie, derivación o compound.

Si efectuamos un control de velocidad será preciso primeramente alimentar el devanado de excitación o inductor, pues éste será el que producirá el par motor (Fig. 5-1).

La corriente del devanado inductor producirá un flujo inductor  $\phi$  y, como consecuencia, se creará el par motor  $T$ , siempre que circule corriente en el circuito del inducido ( $I_a$ ).

Relaciones:

$$V_e = I_e R_e \quad (5-1)$$

$$\phi = K_e I_e \quad (5-2)$$

$$T = K_t I_a \phi \quad (2-1)$$

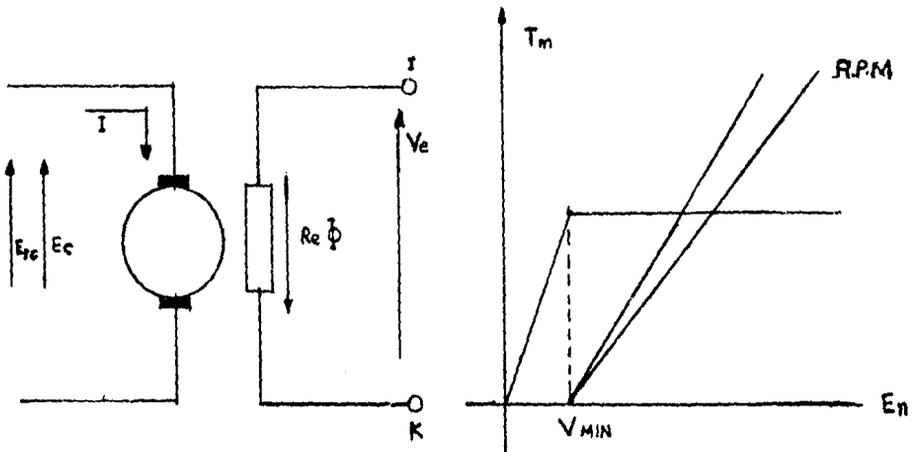


Fig. 5-1 Motor de corriente continua con excitación independiente. Curva de par en función de la tensión del inducido.

en donde:

$V_e$  = tensión excitación

$I_e$  = corriente de excitación

$R_e$  = resistencia del devanado inductor

$T$  = par motor

$I_a$  = corriente de inducido

$R_a$  = resistencia del inducido

$K_t, K_e$  = constantes

5.1.1 Control del Inducido.- Si suponemos aplicada una tensión en el circuito inducido ( $E_t$ ), circulará una corriente  $I_a$  que produce la caída de tensión  $V_{mín} = I_a R_a$ . Si circulan las respectivas corrientes en el inductor y en el inducido, el par motor creado hará girar al rotor (inducido), y tan pronto como empieza a girar se induce en sus conductores (devanado) una fuerza -

contraelectromotriz (f.c.e.m.); pero si se interrumpiese la corriente de excitación, el motor no generaría f.c.e.m. y toda la corriente aplicada entre los extremos de Ra provocaría una corriente muy intensa que quemaría el devanado del rotor y, por tanto, deterioraría el motor.

Relaciones:

$$E_t = E_c + I_a R_a \quad (5-3)$$

$$E_c = k \phi \times \text{rpm} \quad (5-4)$$

En definitiva, si tenemos excitado un motor y aplicamos una tensión variable a su inducido, conseguimos que éste gire y se genere una f.c.e.m. que se opone a la tensión aplicada; por lo que ésta tiene que superar la propia caída interna para que el rotor siga girando. Podemos decir que la velocidad que alcanse es proporcional a la tensión de inducido si mantenemos fijos los demás parámetros

$$\text{rpm} = \frac{E_t - I_a R_a}{k\phi} \quad (2-1)$$

En el gráfico de la figura 5-1 se observa que a partir de la  $V_{mín}$  el par permanece constante, aumentando la velocidad proporcionalmente a la tensión de inducido y la potencia es creciente e igual a

$$P = K_p T \text{ rpm} \quad (5-5)$$

La respuesta del motor sometido a un par resistente atendiendo a sus tensiones e intensidades del inducido es la que obtenemos en la figura 5-2.

Si se aumenta el par resistente se produce un aumento de  $I_a$  y, en consecuencia, una mayor caída interna observándose una

pérdida de velocidad. Si queremos que ello no ocurra nos vemos obligados a incrementar la tensión del inducido.

Diremos, pues, que la velocidad en carga es inferior a la velocidad en vacío para los mismos valores de tensión aplicados y que dicha diferencia la provoca la caída en  $R_a$ . Existe otro factor que influye sobre la velocidad en el aumento de carga, - siendo éste la reacción del propio inducido sobre el devanado inductor tendiendo a debilitar el campo inductor. También afectará al par.

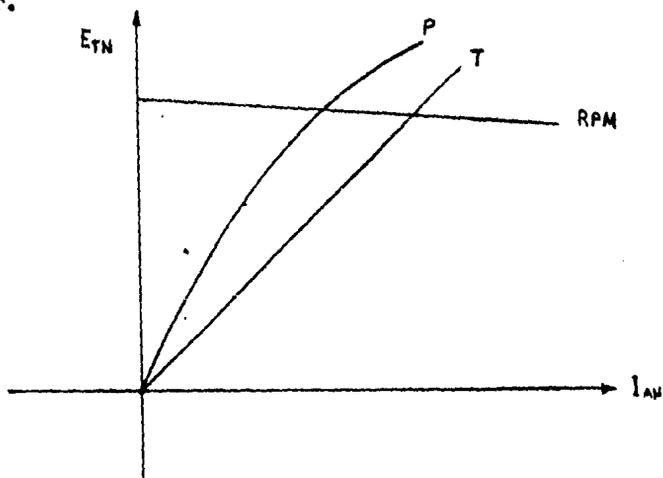


Fig. 5-2 Comportamiento del motor de corriente continua. Curvas de potencia, par y velocidad en función de la corriente del inducido.  $E_{tn}$ ,  $I_{an}$  = tensión y corriente nominales del inducido.

Sabido es que si precisamos de un campo excitatriz para -- crear un flujo que actúe sobre el inducido, éste al ser recorrido por una corriente influirá sobre el campo inductor.

El campo producido por la corriente del inducido da lugar a una deformación del campo principal, originando concentraciones de flujo mayores en la mitad de un polo que en la otra mitad, de forma que en una fracción de polo aumenta la inducción-

debilitándose en la otra.

Este efecto tiene el inconveniente de que el centro polar del motor no tiene inducción nula, habiéndose desplazado su zona neutra un ángulo  $B$  en sentido contrario al giro. Ello obliga a que sean decaladas las escobillas un ángulo igual ( $B^0$ ); este ángulo aumenta cuanto mayor sea la  $I_a$ . En la práctica se corrige este defecto dotando al motor de polos de conmutación o polos auxiliares.

Dichos polos son emplazados en la línea neutra y por ellos se hace circular la corriente de inducido, de forma que crean un campo contrario, anulando la reacción del inducido; así, --- pues, independientemente de la intensidad en circulación conservamos el mismo punto de línea neutra.

Se consigue mejor funcionamiento si además el motor va dotado de devanado compensador entre los devanados auxiliares. Ha**br**emos conseguido anular la reacción del inducido del todo y me**jo**rar la conmutación de tal manera que incluso la tensión entre delgas puede ser mayor y, por tanto, se podrá llegar a grandes-**ve**locidades.

5.1.2 Control de Excitación.--- Es posible variar la velocidad y el par en función de la tensión aplicada al devanado inductor, dejando constante la alimentación del inducido.

Así, pues, una disminución de  $V_e$  provoca una disminución de  $\phi$  y, por lo tanto, disminuye  $T$  aumentando rpm

$$T = K_f I_a \phi \quad (2-1)$$

$$\text{rpm} = \frac{E_t - I_a R_a}{k\phi} \quad (2-2)$$

El comportamiento es el que vemos en el gráfico de la figura 5-3, en el que se aprecia que la potencia se mantiene cons---

tante y la variación inversa de T con rpm.

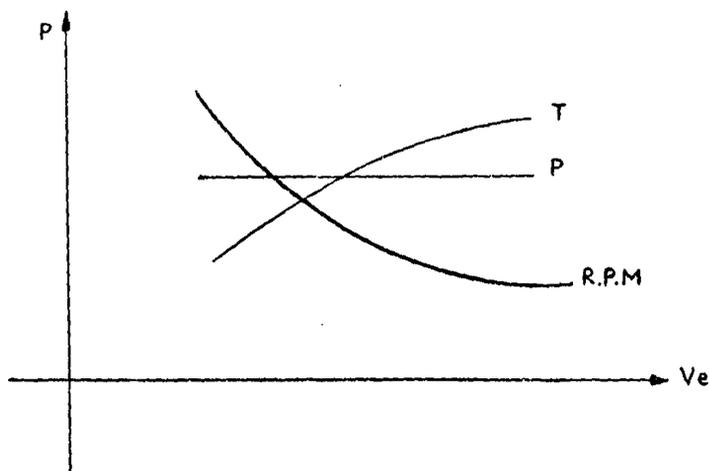


Fig. 5-3 Curvas en función de la tensión de excitación y la potencia.

Dicho control no ofrece una gama amplia de variación puesto que se encuentran dificultades de dimensionado del motor y una mayor influencia de la reacción de inducido; tiene la ventaja que su control se efectúa con corrientes pequeñas, por lo que el equipo es más económico que el equivalente con control de inducido.

## 5.2 CONSTITUCION DEL MOTOR PARA FUNCIONAMIENTO CON TIRISTORES

Es importante informar al fabricante del motor que éste va ir conectado a un grupo de tiristores, pues existen diferencias en la alimentación del inducido, según provenga ésta de un grupo rotativo o de un grupo de tiristores.

El primero genera una corriente y una tensión de formas de onda continuas mientras que el segundo imprimirá unas formas de onda de impulsos coincidiendo con el corte de una tensión alterna para un ángulo determinado de cebado del SCR. La frecuencia de estos impulsos varía según sea un sistema monofásico o trifásico.

Ello hace que el motor deba estar preparado para soportarlos transitorios en la conmutación de los SCR.

Se construirá el colector del motor de manera que la tensión entre delgas sea pequeña; de esta manera se eliminan las sobretensiones en la conmutación, que producen un arco destructor del colector.

También será importante anular la reacción de inducido y conseguir una buena línea neutra. Para ello es necesario que los núcleos de los devanados auxiliares sean construidos para trabajar en régimen de impulsos.

Las escobillas deberán tener una buena resistencia de contacto a fin de eliminar la caída de tensión en ellas durante la conmutación. Una buena conmutación requiere que la corriente se anule por cortocircuito de las escobillas y aumente cambiando de sentido, lo cual presupone una vigilancia periódica del colector seguida de una limpieza y verificación del mismo, para evitar tener que rectificarlo en el torno con demasiada frecuencia.

En un motor en buen estado y concebido para ser controlado por un grupo estático, no debe apreciarse chispeo en el colector si éste trabaja dentro de las características de placa. De no ser así, la producción del arco o chispeo puede ser provocado por un deficiente calado de las escobillas, debiendo proceder inmediatamente a su ajuste, operación que no tiene ninguna complicación pues los tornillos del portaescobillas son total--

mente accesibles y girándolos lentamente a uno u otro lado de la posición inicial se puede conseguir la extinción de la chispa.

### 5.3 FUNDAMENTO DE UN SISTEMA VARIADOR ELECTRONICO

Hasta este momento se ha hablado de variación de velocidad y en este caso el transductor deberá transformar las revoluciones del eje del motor en una tensión proporcional a éstas. Puede presentarse el caso de que interese un control de corriente de inducido y entonces el parámetro a comparar será  $I_a$ , caso en el cual deberemos disponer de un transductor que convierta las grandes corrientes de inducido en tensiones proporcionales, a fin de mantener constante dicha corriente.

Es posible complicar el sistema si interesa hacer controles combinados y operar con las variables que intervienen. Por ejemplo, en un control de inducido en el que se quiera conseguir una variación de velocidad para un par dado sin pérdida de revoluciones cualesquiera que sea el par aplicado, será necesario medir sus parámetros: primeramente mediremos la velocidad del motor a fin de mantenerla constante y en segundo lugar operaremos con la corriente de inducido con el fin de que no sea sobrepasado el valor nominal de  $I_a$  al requerirse un par motor grande en un tiempo corto o permanentemente.

En realidad se pretende conseguir con el servosistema un mejoramiento de las características del motor a la vez que se le protege (fig. 5-4).

En cualquier caso la velocidad se mantiene constante excepto cuando es sobrepasada la corriente de placa, momento en que-

si hay más demanda de par, se disminuye la velocidad, o lo que es lo mismo, se deberá disminuir la tensión de armadura, con lo que queda protegido el motor ya que automáticamente se consigue una reducción de potencia. En la figura 5-5 tenemos un esquema-

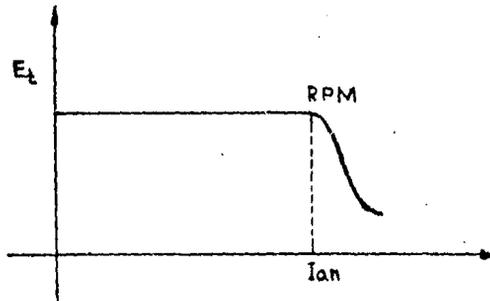


Fig. 5-4 Comportamiento de un convertidor aplicado a un motor de corriente continua.

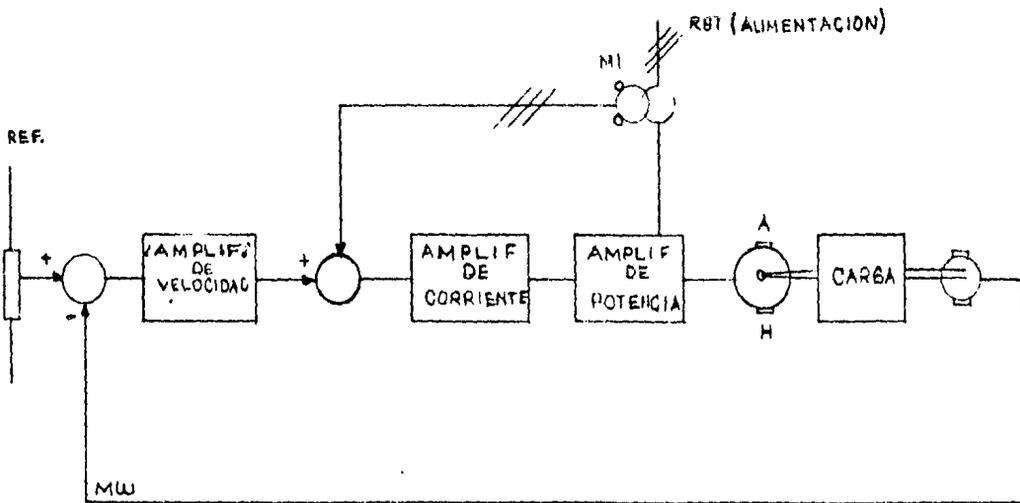


Fig. 5-5 Diagrama de bloques de un servosistema.

simplificado del servosistema.

Por medio de un potenciómetro llamado de 'referencia' o de 'mando', cuya carátula vendrá graduada en revoluciones/mín., se gobierna el amplificador de velocidad pasando antes por un bloque de suma-resta en que incide la señal procedente de la dínamo taquimétrica (DT).

Supongamos que partimos de motor parado y queremos llevarlo a unas revoluciones determinadas. Daremos tensión de referencia que pasará íntegra al bloque amplificador ya que no tenemos todavía reacción de la dínamo taquimétrica. El amplificador generalmente tenderá a la saturación por lo que atacaremos el segundo amplificador. El amplificador de corriente una vez saturado, pedirá máxima ganancia al amplificador de potencia, es decir, obligará a los tiristores del bloque de potencia a conducir con un ángulo de conducción relativamente grande. En este momento el medidor de corriente MI actúa con tendencia a la limitación, eliminando sobreintensidades peligrosas para los tiristores y el motor. Cuando exista f.c.e.m. es porque el motor gira y al mismo tiempo la dínamo taquimétrica informará de su velocidad al primer amplificador. Existirá un momento que la lectura de velocidad se igualará a la referencia, con lo que la señal del primer amplificador será prácticamente nula, colocando toda la cadena en corte. El par de rozamiento y el mismo par de aplicación reducirán la velocidad del motor por debajo de las rpm fijadas; a partir de este momento la cadena amplificada vuelve a funcionar, estabilizándose el sistema.

La diferencia de la tensión 'referencia' y la tensión proporcional a las revoluciones se llama 'señal error'. Dicha señal se encargará de mantener las revoluciones, pues a una señal error grande le corresponde una gran ganancia de la cadena y viceversa.

Antes de resolver el servosistema planteado es conveniente dar algunas definiciones de Servomecanismos:

5.3.1 Sistemas de Control en Anillo Cerrado.- Los sistemas de control en anillo cerrado son aquellos en los que la acción de control depende tanto de la entrada de referencia como del valor instantáneo que toma la variable de salida. En otras palabras, un sistema de control en anillo cerrado implica el hacer uso del efecto de realimentación de la variable de salida a la entrada del sistema con objeto de reducir el error que pudiera producirse en la variable de salida por efecto de la aparición de perturbaciones en el sistema. La figura 5-6 muestra esquemáticamente la relación entrada-salida de un sistema de control en anillo cerrado.

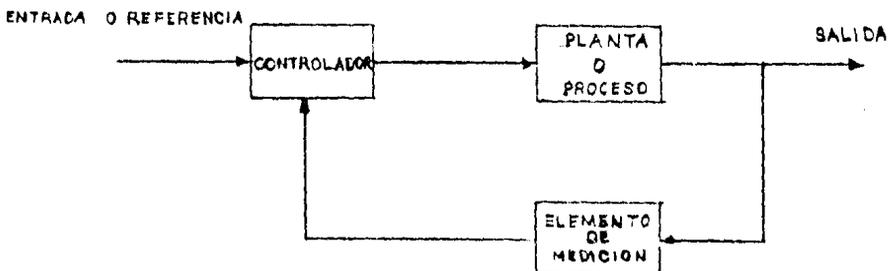


Fig. 5-6 Esquema simplificado de un sistema de control en anillo cerrado.

5.3.2 Servosistema Regulador.- Es un servosistema de control automático en anillo cerrado en el cual el objetivo es que la variable de salida se mantenga constante frente a las perturbaciones.

nes exteriores. Ejemplos de servosistemas reguladores son el regulador de Watt para las máquinas de vapor, los estabilizadores de rumbo para barcos y aviones, los estabilizadores de tensión, los reguladores de velocidad, etc..

5.3.3 Diagramas de Bloques de un Sistema de Control.- Consisten en la utilización de líneas y rectángulos mediante los que se representan los elementos que forman parte de un sistema de control, así como el recorrido y el sentido de las señales que van de un elemento a otro.

Los elementos funcionales más importantes en este sistema de representación son:

- (a) El bloque de transferencia.
- (b) El nudo.
- (c) Las señales de entrada, salida y de reacción.

El bloque de transferencia se caracteriza por expresar mediante un rectángulo la relación que existe entre la señal de entrada y la de salida de cada uno de los componentes de un sistema de control. Su representación es la indicada en la figura 5-7.

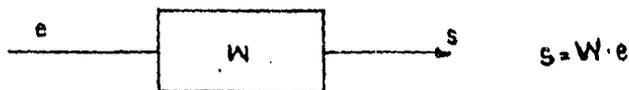


Fig. 5-7 Expresión de un bloque de transferencia.

El nudo se utiliza en aquellos casos en los que dos o más segmentos representativos de señales del sistema se encuentran-

para dar lugar a un nuevo segmento de salida. Se pueden dar, -- por lo tanto, nudos aditivos o sustractivos en los cuales la se ñal de salida es la suma o diferencia de las señales de entrada tal como se indica en la figura 5-8.

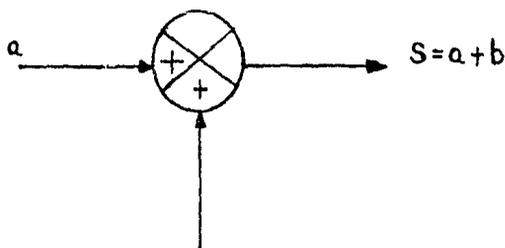


Fig. 5-8 Expresión de un nudo aditivo.

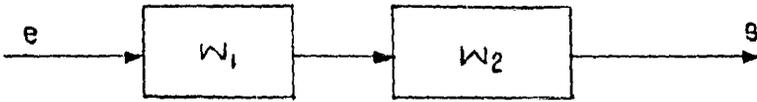
Las señales de un sistema se representan mediante segmen-- tos orientados, los cuales pueden ser de entrada cuando se diri-- gen a un bloque, de salida cuando salen de un bloque y del tipo de reacción que corresponde al caso en que una señal se usa pa-- ra realimentación.

5.3.4 Conexión de los Bloques.- Los bloques pueden estar situa-- dos entre sí de tres distintas formas:

1. En serie.- Dos bloques están en serie cuando la salida-- de un bloque está unida a la entrada del siguiente (Fig. 5-9).

2. En paralelo.- Dos bloques están en paralelo cuando tie-- nen la misma señal de entrada y sus salidas convergen en un nu-- do aditivo (Fig. 5-10).

3. En anillo.- Dos o más bloques están en anillo cuando la salida del último está unido con la entrada del primero (Fig. -- 5-11).



$$S = W_1 \cdot W_2 \cdot e$$

Fig. 5-9 Esquema de bloques en serie.

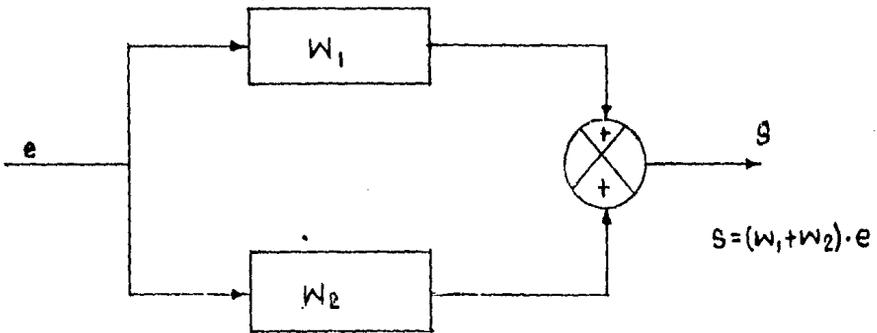


Fig. 5-10 Esquema de bloques en paralelo.

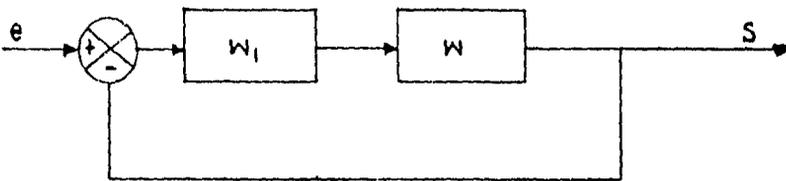


Fig. 5-11 Esquema de bloques en anillo.

### 5.3.5 Simplificación de un Esquema de Bloques. Forma Canónica.-

Dado el esquema de bloques de un sistema de control o de un circuito determinado siempre es posible reducirlo a una estructura particular llamada forma canónica según se indica en la figura 5-12.

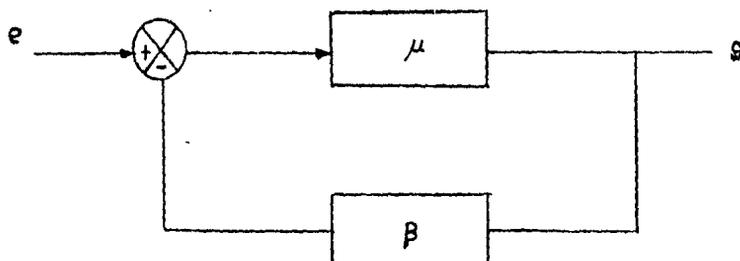


Fig. 5-12 Esquema de bloques en forma canónica.

$U$  recibe el nombre de ganancia de la cadena de acción y  $B$  el de ganancia de la cadena de reacción.

Para reducir un esquema de bloques a su forma canónica se siguen las siguientes reglas de simplificación:

1. Varios bloques en serie equivalen a un sólo bloque cuya función de transferencia es igual al producto de las funciones de transferencia de cada uno de los bloques en serie, según se indica en la figura 5-13.

2. Varios bloques conectados en paralelo equivalen a un sólo bloque cuya función de transferencia es igual a la suma de las funciones de transferencia de los bloques en paralelo, tal-

como se indica en la figura 5-14.

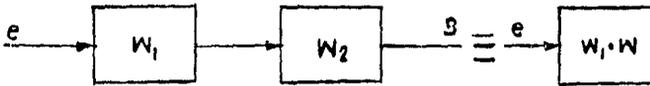


Fig. 5-13 Simplificación de bloques en serie.

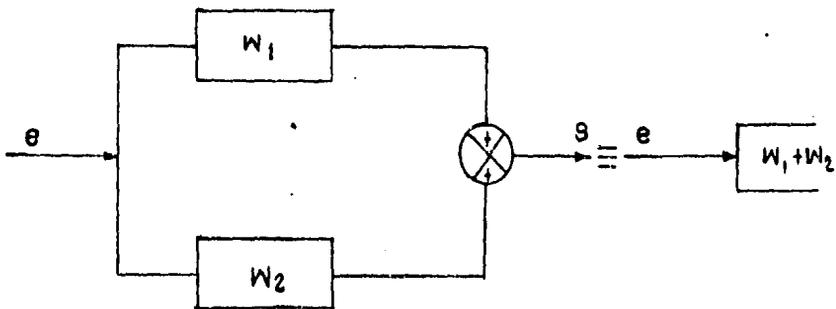


Fig. 5-14 Simplificación de bloques en paralelo.

5.3.6 Función de Transferencia de un Esquema en Forma Canónica. Dado un esquema de bloques en su forma canónica es posible obtener la función de transformación correspondiente a la relación que existe entre la señal de entrada y la señal de salida. Para ello se parte del esquema en forma canónica suponiendo que el nudo es diferenciador según se indica en la figura 5-15.

De dicho esquema se obtienen las siguientes relaciones:

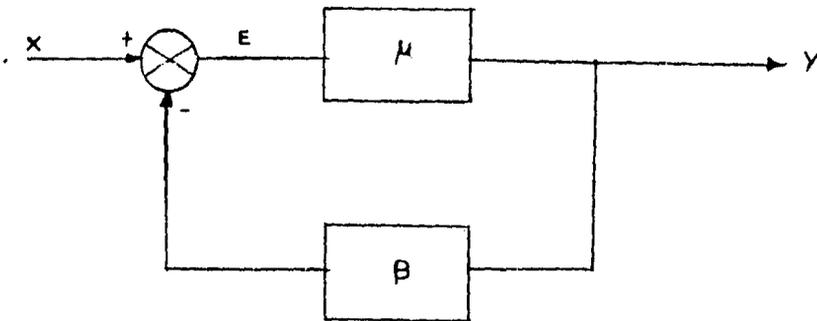


Fig. 5-15 Esquema de bloques en forma canónica.

$$E = x - By$$

$$y = UE$$

$$\text{luego, } E = \frac{y}{U}$$

Sustituyendo el valor de E resulta:

$$\frac{y}{U} = x - By$$

$$y = Ux - UBy$$

$$y + UBy = Ux$$

$$y(1 + UB) = Ux$$

$$\underline{\underline{w = \frac{y}{x} = \frac{U}{1 + UB}}}$$

En consecuencia, el esquema de bloques inicial es equivalente a un bloque como el indicado en la figura 5-16.

De la observación de esta expresión se deduce que si  $UB \gg 1$  resultará que

$$1 + UB \simeq UB$$

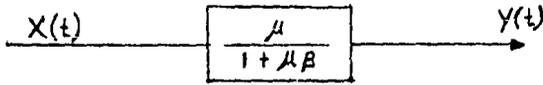


Fig 5-16 Bloque equivalente a un esquema en forma canónica.

luego

$$W = \frac{Y}{X} = \frac{U}{1 + UB} \approx \frac{U}{UB} = \frac{1}{B}$$

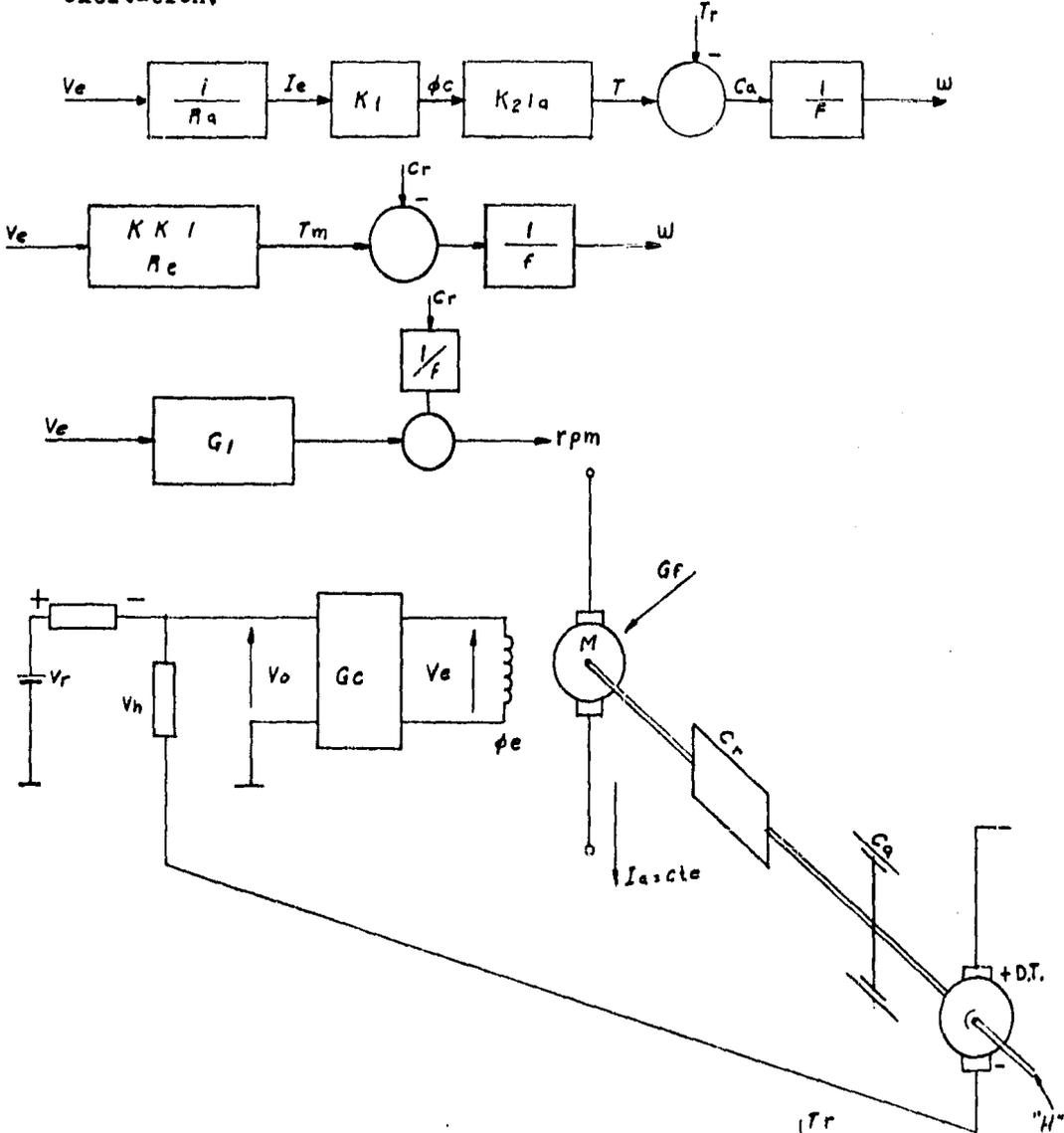
ello quiere decir que en dicho caso la ganancia del sistema no depende apenas de la ganancia de la cadena de acción y si en cambio casi totalmente de la ganancia de la cadena de reacción.

Ahora sí, teniendo presente los conceptos anteriores, resolvamos el servosistema planteado con control por excitación.

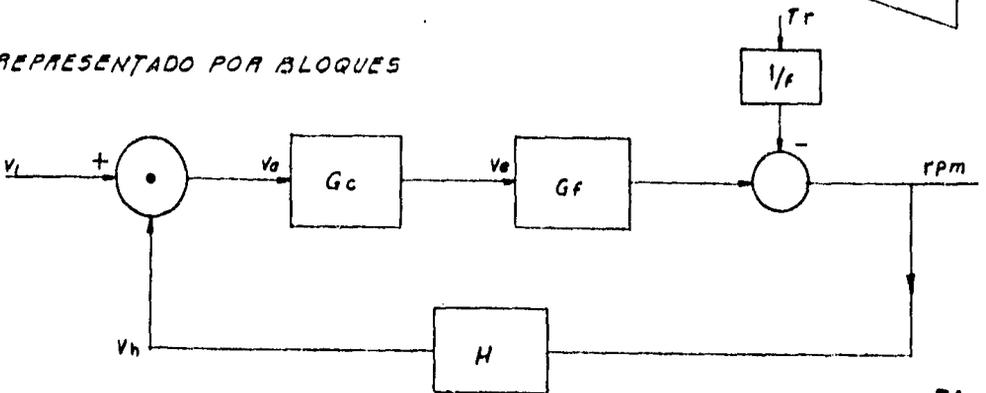
5.3.7 Estudio del Control de Excitación.- Suponiendo que disponemos de una fuente que genera  $V_e$  (fig. 5-17), obtendremos  $I_e$  con sólo dividir por  $R_e$ . La corriente de excitación multiplicada por  $K_e$ , constante propia de la construcción del devanado, nos da el flujo de excitación.

Aplicando las relaciones ya conocidas obtenemos el par motor  $T$ . Restando al par motor el par resistente  $T_r$ , se obtiene el par de rozamiento, que dividido por su coeficiente de fricción  $f$  da velocidad.

Fig. 5-17. Diagramas de bloques para el estudio del control por excitación.



REPRESENTADO POR BLOQUES



En definitiva:

$$rpm = G_f V_e - \frac{1}{f} Tr$$

$G_f$  es la función de transmisión del motor:

$$G_f = -\frac{K_e K_a I_a}{f R_e}$$

De esta expresión se deduce que la velocidad (rpm) es afectada por una eventual variación de la corriente del inducido -- (perturbación paramétrica), y de la variación del par resistente (perturbación adicional).

Si deseamos mejorar el sistema, esto es, si deseamos que la salida (rpm) sea lo más constante posible ante variaciones de la corriente  $I_a$ , deberemos llevar la señal de la salida a la entrada y confrontarlas, hasta lograr que la diferencia entre ambas  $E$  (señal error) sea lo más pequeña posible.

Por regla general la salida y la entrada del sistema tienen dimensiones físicas distintas; es necesario un captador electrónico que traduzca la magnitud física de salida en una magnitud homogénea con la entrada. Este transmisor o captador debe ser de elevada precisión. Cuanto acabamos de exponer podemos verlo en la figura 5-17.

Al servosistema original se le ha aplicado una cadena de reacción mediante un bloque de transmisión  $H$ ; en nuestro caso se trata de una dinamo taquimétrica. La señal de salida  $V_h$  es confrontada con una tensión de referencia  $V_r$ , y la señal diferencia  $V_o$ , es amplificada mediante un amplificador de ganancia  $G_c$  (bloque de compensación).

$G_f$  representa la función de transmisión del servomecanismo (en nuestro caso se trata de un motor eléctrico de c.c.)

Haciendo

$$G_{ef} = \frac{GcG_f}{1 + HGcG_f}$$

tendremos que (figura 5-18):

$$S = \left( \frac{GcG_f}{1 + HGcG_f} \right) R - \left( \frac{1}{GcG_f} \frac{GcG_f}{1 + HGcG_f} \right) Pa$$

Pero como quiera que  $Gc \gg 1$  ( $Gc \approx 10^4$  a  $10^6$ ) se tendrá ---  
 $HGcG_f \gg 1$ , luego:

$$S = \frac{1}{H} R - \left( \frac{1}{HGcG_f} \right) Pa$$

Pero como  $H$  suele ser menor que la unidad, se cumple:

$$\frac{1}{H} \gg 1, \text{ ya que } H \ll 1$$

De estas aproximaciones deducimos que por el hecho de introducir una cadena de reacción (o retroreacción) se obtiene:

1.º La salida  $S$  depende de la señal de referencia  $R$ , multiplicada por  $1/H$  (cociente que siempre es mayor que la unidad).--  
 Dada la dependencia de estos dos niveles, deberán ser de elevada precisión.

2.º Las perturbaciones adicionales ( $Pa$ ) se ven reducidas --  
 considerablemente puesto que en la expresión final quedan divididas por  $HGcG_f \gg 1$

$$\frac{Pa}{HGcG_f} \rightarrow 0$$

La perturbación adicional  $Pa$ , que afecta a la salida, se reduce tanto más cuanto mayor sea  $Gc$ . Ordinariamente es del or-

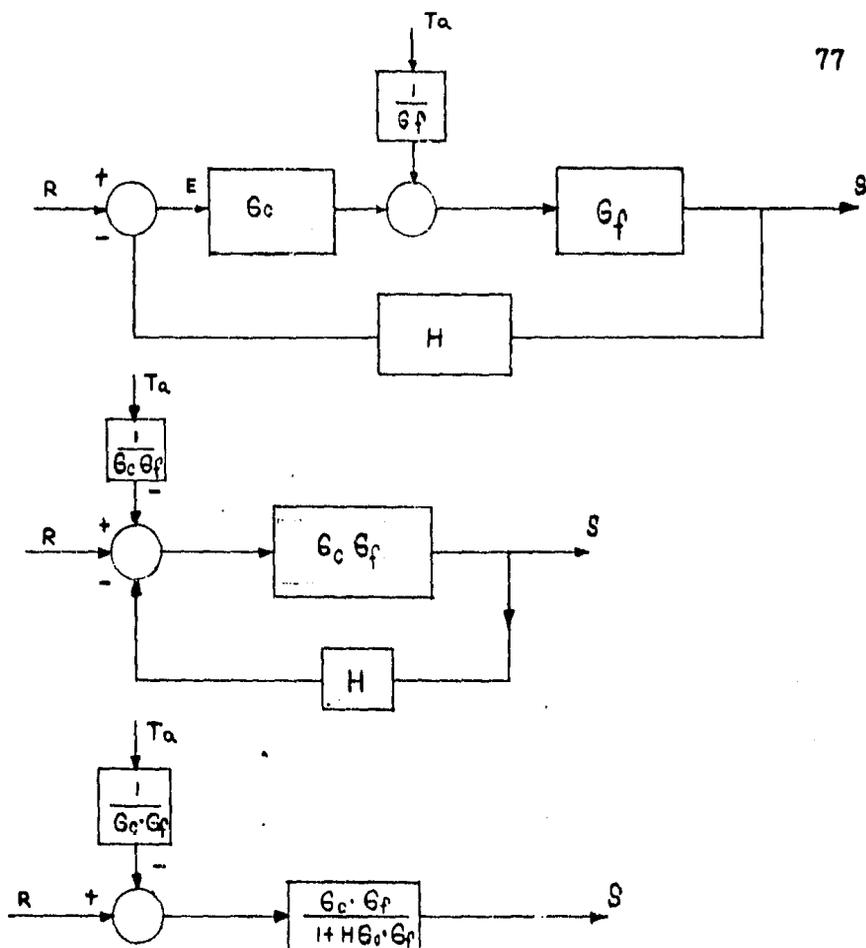


Fig. 5-18 Diagramas de bloques para el estudio del control por - excitación realimentado.

den de  $10^4 - 10^6$ .

Se comprenderá entonces fácilmente la gran estabilidad del-servomecanismo que depende casi exclusivamente del captador  $H$  y del nivel  $R$ .

Características del bloque H:

Debe trabajar a un mínimo de potencia y tensión relativamente elevada. De esta forma evitamos que introduzca errores apreciables. También deberá tener una gran precisión.

Será interesante conocer la influencia de cada una de las funciones de transmisión  $G_c$ ,  $G_f$  y  $H$  sobre la estabilidad del servomecanismo.

Veamos como afectarían al sistema las variaciones de cada uno de los bloques.

Como vimos antes,

$$G_{ef} = \frac{G_c G_f}{1 + H G_c G_f}$$

Hallaremos los errores porcentuales

$$\frac{\partial G_{ef}}{G_{ef}}; \frac{\partial G_c}{G_c}; \frac{\partial G_f}{G_f}; \frac{\partial H}{H}$$

$$\frac{\partial G_{ef}}{\partial G_c} = \frac{G_f(1 + H G_c G_f) - G_c G_f^2 H}{(1 + H G_c G_f)^2} = \frac{G_f}{(1 + H G_c G_f)^2}$$

$$\frac{\partial G_{ef}}{\partial G_c} = \frac{G_c G_f}{(1 + H G_c G_f)} \frac{1}{G_c(1 + H G_c G_f)} = \frac{1}{G_c(1 + H G_c G_f)} G_{ef}$$

y deducimos

$$\frac{\partial G_{ef}}{G_{ef}} = \frac{\partial G_c}{G_c} \frac{1}{(1 + H G_c G_f)}$$

De esta forma se deduce que el error que introduce  $G_c$  en la  $G_{ef}$  es tanto menor cuanto mayor sea la ganancia del amplificador  $G_c$ .

$$\frac{\partial G_{ef}}{\partial H} = \frac{-(G_c G_p)^2}{(1 + H G_c G_p)^2} = G_{ef} \frac{G_c G_p}{(1 + H G_c G_p)} \approx \frac{1}{H} G_{ef}$$

$$\frac{\partial G_{ef}}{\partial H} = G_{ef} \frac{1}{H}; \quad \frac{\partial G_{ef}}{G_{ef}} = \frac{\partial H}{H}$$

De esta nueva expresión se deduce que el bloque de transmisión  $H$  de la cadena de reacción debe ser de alta precisión pues su error influye directamente sobre la  $G_{ef}$ .

Volviendo a nuestro caso del control de la velocidad del motor de c.c. tendremos que, si la dinamo taquimétrica tiene una constante  $H$ , la tensión en sus bornes será  $V_h$  que, congruente con la tensión  $V_r$  que se obtiene de una fuente estabilizada, es amplificada  $G_c$  veces; la tensión de salida del  $G_c$  alimenta directamente a los bobinados de excitación del motor.

Dado un determinado valor de referencia  $V_r$ , el motor acelerará hasta que la tensión de retroalimentación  $V_h$  de la DT alcance un valor total que el flujo de excitación del motor haga que el par motor iguale la suma del par resistente y del par de rozamiento

$$T = T_r + T_a$$

En las condiciones de régimen el motor gira a una velocidad angular uniforme.

Si, por ejemplo, aumentamos la carga del motor, la velocidad de su eje tiende a disminuir y, por lo tanto, la tensión  $V_h$  disminuye a su vez, por lo cual aumenta el valor de  $V_o$ , de la tensión de error

$$|V_o| = |V_r| - |V_h|$$

ocasionando al mismo tiempo un aumento del par motor que neutraliza el incremento del par resistente, cumpliéndose una vez más

$$T = T_r + T_a$$

5.3.8 Estudio del Control de Armadura.- Alimentando el circuito de excitación con una tensión constante y variando la corriente de armadura, se logra variar la velocidad del motor de corriente continua.

Por ejemplo, todos los motores de c.c. usados en instrumentos, emplean un campo fijo de imán permanente y la señal de control es aplicada a los terminales del inducido.

Sea el motor de c.c. controlado en el inducido que puede verse en la Fig. 5-19a.

En este sistema,

$R_a$  = resistencia del devanado del inducido en ohmios

$L_a$  = inductancia del devanado del inducido en henrios

$i_a$  = corriente del devanado del inducido en amperios

$i_e$  = corriente de campo en amperios

$e_t$  = tensión aplicada a la armadura en voltios

$e_c$  = fuerza contraelectromotriz en voltios

$\theta$  = desplazamiento angular del eje del motor en radianes

$T$  = par desarrollado por el motor en libras-pie

$J$  = momento de inercia equivalente del motor y carga con referencia al eje del motor en slug-pie<sup>2</sup>

$f$  = coeficiente de fricción viscosa equivalente del motor y carga referido al eje del motor en libras-pie/rad/s

El par  $T$  desarrollado por el motor es proporcional al producto de la corriente de inducido  $i_a$  y el flujo  $\phi$  del entrehie-

rro, que a su vez es proporcional a la corriente del campo o

$$\phi = Ke i_e$$

donde  $Ke$  es una constante. Por tanto, se puede escribir el par-  
T

$$T = Ke i_e K_2 i_a$$

donde  $K_2$  es una constante.

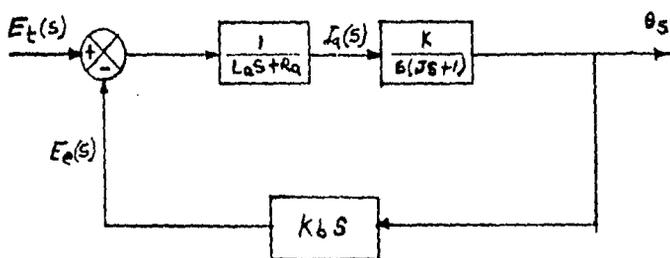
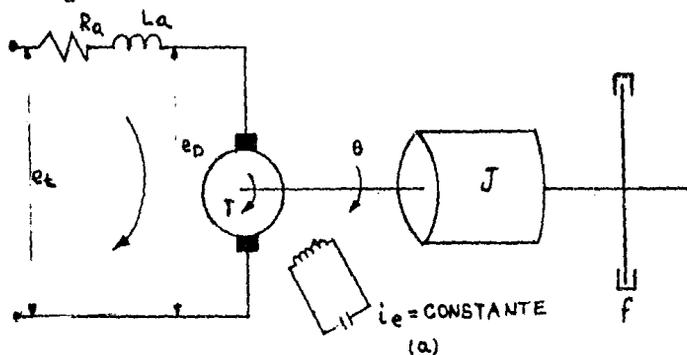


Fig. 5-19 (a) Diagrama esquemático de un motor de c.c. controlado por el inducido; (b) diagrama de bloques.

En el motor de c.c. controlado en el inducido, se mantiene constante la corriente del campo. Para una corriente de campo - constante el flujo se vuelve constante y el par se hace directamente proporcional a la corriente del inducido, de manera que

$$T = K_u i_a$$

donde  $K_u$  es una constante del par motor. Cuando el inducido está en rotación, se induce en el inducido una tensión proporcional al producto del flujo por la velocidad angular. Para un flujo constante, la tensión inducida  $e_c$  es directamente proporcional a la velocidad angular  $d\theta/dt$ . Así,

$$e_c = K_b \frac{d\theta}{dt} \quad (5-6)$$

donde  $K_b$  es una constante de fuerza contraelectromotriz.

Se controla la velocidad de un motor de c.c. controlado -- por el inducido por medio de la tensión de inducido  $e_t$ . La tensión de inducido  $e_t$  es suministrada por un amplificador (o por un generador a su vez alimentado por un amplificador). La ecuación diferencial del circuito de inducido es

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_c = e_t \quad (5-7)$$

La corriente de inducido produce el par que se aplica a la inercia y fricción; por tanto

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + r \frac{d\theta}{dt} = T = K_u i_a \quad (5-8)$$

Suponiendo que todas las condiciones iniciales son cero, y

tomando las transformadas de Laplace de las ecs. (5-6), (5-7) y (5-8), se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$K_b s \Theta(s) = E_c(s) \quad (5-9)$$

$$(L_a s + R_a) I_a(s) + E_c(s) = E_t(s) \quad (5-10)$$

$$(J s^2 + f s) \Theta(s) = T(s) = K_u I_a(s) \quad (5-11)$$

Considerando a  $E_t(s)$  como la entrada y  $\Theta(s)$  como la salida se puede construir el diagrama de bloques de las Ecs. (5-9), -- (5-10) y (5-11), como puede verse en la figura 5-19b. Se ve el efecto de la fuerza contraelectromotriz en la señal de realimentación, proporcional a la velocidad del motor. Esta fuerza contraelectromotriz, por tanto, aumenta el amortiguamiento efectivo del sistema. Se obtiene la función transferencia de este sistema como

$$\frac{\Theta(s)}{E_t(s)} = \frac{K_u}{s(L_a J s^2 + (L_a f + R_a J)s + R_a f + K_u K_b)} \quad (5-12)$$

La inductancia  $L_a$  en el circuito de inducido generalmente es pequeña y se la puede despreciar. Si se desprecia  $L_a$ , la función transferencia dada por la ec. (5-12) se reduce a

$$\frac{\Theta(s)}{E_t(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (5-13)$$

donde

$K_m = K_u / (R_a f + K_u K_b) =$  constante de ganancia del motor

$T_m = R_a J / (R_a f + K_u K_b) =$  constante de tiempo del motor

De las ecs. (5-12) y (5-13) se puede ver que las funciones transferencia involucran el término  $1/s$ . Por tanto, este sistema posee una propiedad integrativa. En la ec. (5-13) puede notarse que la constante de tiempo del motor es más pequeña al ser más pequeña  $R_a$  y más pequeña  $J$ . Con  $J$  pequeña, al reducirse la resistencia  $R_a$ , la constante de tiempo del motor tiende a cero y el motor actúa como un integrador ideal.

5.3.9 Comparación del Comportamiento del Motor de c.c. Controlado por Inducido con el Motor de c.c. Controlado por Campo.- Una ventaja del motor de c.c. controlado por campo es que el amplificador necesario puede ser simplificado debido al bajo requerimiento de potencia del campo de control. Sin embargo, la necesidad de una fuente de corriente constante es una importante desventaja en el funcionamiento controlado por campo. Es mucho más difícil disponer de una fuente de corriente constante que de una fuente de tensión constante. La operación controlada por campo tiene algunas desventajas más resp to a la del motor de ---c.c. controlado por inducido. En el motor de c.c. controlado ---por inducido, la fuerza contraelectromotriz actúa como una amortiguación; en el motor de c.c. controlado por campo, en cambio, no es ese el caso y hay que proveer la necesaria amortiguación para el motor y la carga.

Las constantes de tiempo del motor de c.c. controlado por campo generalmente son grandes en comparación con las constantes de tiempo de un motor equivalente controlado por inducido.- Al efectuar una comparación de constantes de tiempo entre funcionamiento con control por campo y con control por inducido ---hay que tomar en consideración la constante de tiempo del amplificador de potencia en el estudio del funcionamiento controlado por inducido.

5.4 REGULADOR DE VELOCIDAD CON TIRISTORES

Ya que es eléctricamente muy difícil medir la f.o.e.m., -- los reguladores que pueden controlar los ángulos de conducción del tiristor trabajan con el voltaje promedio y si se requiere mejor regulación de voltaje se provee de un circuito de compensación de caída IR, en la Fig. 5-20 se muestra un regulador sen cillo. Se usa un circuito que incluye los resistores R1, R2, R3

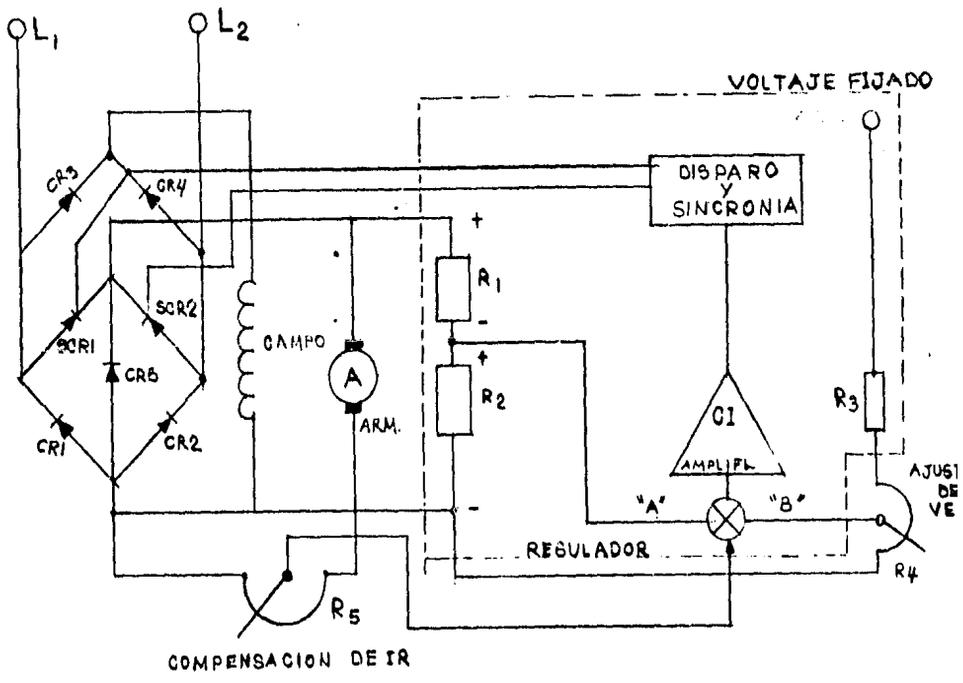


Fig. 5-20 Regulador de velocidad de un motor de c.c. en derivación.

y el resistor variable R4; mientras el voltaje en el punto A se a igual al voltaje en el punto B existe un balanceo, si A resulta menor que B fluye una corriente de encendido en el amplificador aumentando la salida en el circuito de encendido que convierte la corriente en pulsos, la cual, a su vez, enciende más los tiristores provocando un aumento en la velocidad que nuevamente establece el balance entre A y B. Si A aumenta debido a una velocidad superior resultante de una reducción en la carga del motor, ocurre la acción contraria y el amplificador inicia una corrección en el voltaje de armadura para mantener el balance. Si la posición de R4 se ajusta, una secuencia idéntica se requiere para establecer un balance en la entrada del amplificador y, por lo tanto, la velocidad puede ajustarse variando R4 y la regulación del voltaje promedio en la armadura será un resultado automático, aún cuando se tengan variaciones de carga en cualquier velocidad.

5.4.1 Compensación de Caída IR.- Ya que mantener el voltaje promedio en la armadura del motor no es equivalente a mantener la velocidad debido a la caída IR, el resistor R5 se usa para desarrollar un voltaje proporcional a la corriente de armadura. Parte del voltaje de R5 se puede aplicar al amplificador y se obtendrá el mismo resultado que cuando se aplica más voltaje donde R4, (se producirá un aumento en la velocidad).

5.4.2 Corriente Límite.- Ya que la armadura se diseña con una mínima resistencia para reducir la caída IR, son necesarios algunos medios para reducir la avalancha de corriente durante el-

arranque o cuando se tiene sobrecargas externas, especialmente en un motor de alto caballaje. Un circuito para realizar la función de la corriente límite se muestra en la figura 5-21. La --

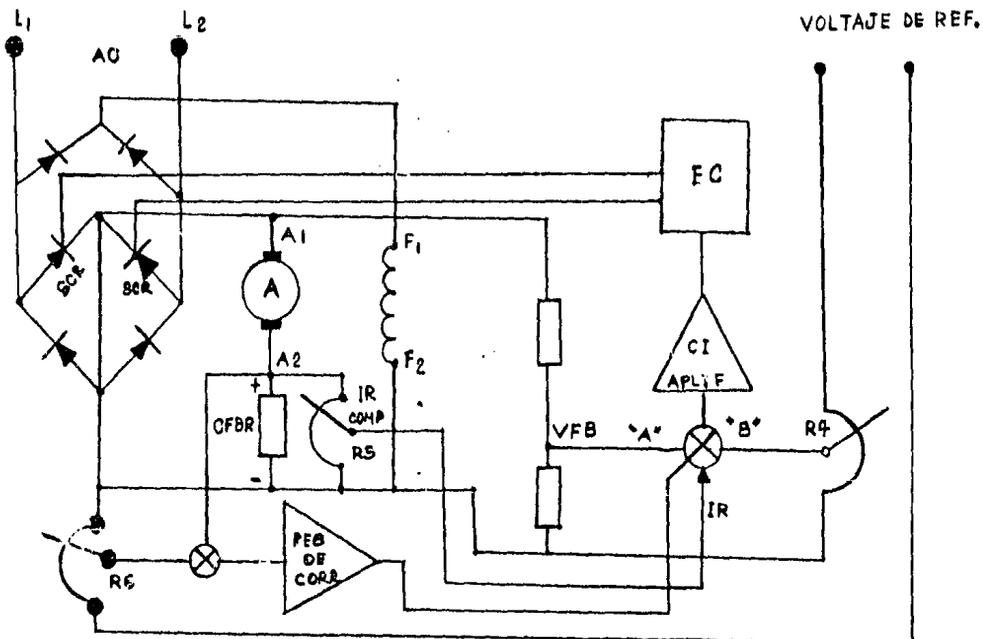


Fig. 5-21 Circuito de caída IR y limitación de corriente.

corriente del regulador permanece prácticamente inactiva hasta que la corriente del motor excede la posición de umbral en el potenciómetro 6. La corriente en el regulador está realmente a una alta velocidad comparada con la del amplificador, la cual -

produce un voltaje negativo a la entrada del amplificador de error, produciendo así automáticamente la velocidad para mantener la corriente en el nivel seleccionado por el potenciómetro-6.

5.4.3 Control de Aceleración.- Cuando el panel de control se enciende, en el esquema de la figura 5-21, se presenta instantáneamente el voltaje en el punto B e inicia un aumento instantáneo de la velocidad para balancear el error del amplificador. Este voltaje instantáneo aplicado a la armadura puede dañar ya sea al motor o a los rectificadores del panel, ya que la corriente elevada puede ser rápida para que el circuito de corriente límite la detecte y actúe. Para prevenir esa oleada de corriente, el panel de control se le incorpora un circuito similar al de la figura 5-22. Este circuito implica un resistor adicional R7 y también un capacitor  $C_1$ . Con el circuito de la figura 5-22, cuando el panel de control se enciende la posición de velocidad aparece instantáneamente en el punto C, sin embargo, el voltaje en el punto B se eleva ligeramente debido al efecto limitador de la corriente de carga  $C_1$  que ofrece R7.

Después de un intervalo el capacitor se carga completamente y el punto B se iguala entonces al punto C. El efecto de este circuito resulta similar al aumento gradual de R4 cada vez que el panel se enciende.

El panel de control también está provisto de medios para la interrupción de  $C_1$  cada vez que se apaga, con el fin de condicionarlo desde una aceleración desde cero en lugar de una carga que podría permanecer desde previos funcionamientos. (Fig. 5-23).

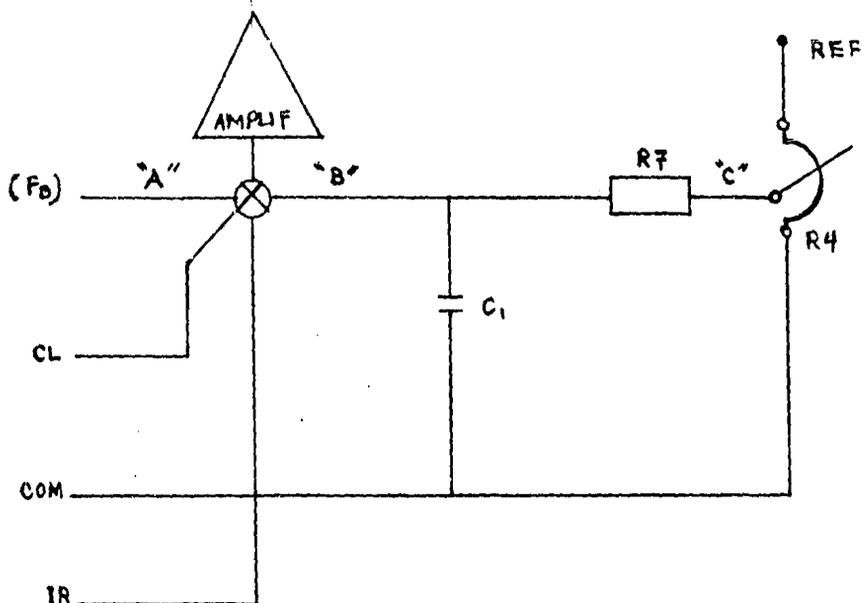


Fig. 5-22 Circuito de aceleración.

5.4.4 Funciones de Interrupción.- La figura 5-23 muestra un circuito elemental aplicable a sistemas de control estado sólido.- Se usa un interruptor para conectar y desconectar el circuito de armadura del motor.

El campo del motor no necesita ser interrumpido; puesto -- que tiene un bajo valor de corriente, puede absorber corriente sin considerar como se conecta.

Además del arranque y detención del motor, el interruptor--mostrado en la figura 5-23, ofrece también la siguiente fun----ción: cuando se apaga, automáticamente descarga el capacitor de



APLICACION  
(Trenes de Laminación)

La potencia máxima necesaria, en los trenes de laminación, llega, según los casos, a 6000 ó 10000 HP; siendo a veces necesario hasta ocho cambios de marcha por minuto.

Para el funcionamiento de estos trenes deben cumplirse las siguientes condiciones: regularidad de marcha de los motores de accionamiento desde la posición de reposo hasta 110 o 120 rpm; - arranque y paro hasta seis veces por minuto, inversión de la -- marcha, aceleración hasta el número total de revoluciones en -- tres o cuatro segundos, desarrollo de un par motor medio corres-- pondiente a una potencia de 3600 HP y un par máximo correspon-- diente a una potencia de 10000 HP a 110 rpm.

Para alcanzar un arranque rápido con un par motor lo más - reducido posible, es necesario que sea reducido el momento de i nercia del inducido del motor del tren, lo cual se alcanza re-- partiendo la potencia en tres unidades idénticas. Los tres moto-- res aceleran hasta 110 rpm en cuatro segundos, con un par motor correspondiente a una potencia de 2000 HP.

En un grupo convertidor se tiene un motor trifásico síncro no de 2500 HP a 3000 voltios-375 rpm, y dos dínamos de arranque y dos volantes de acero fundido de 26 ton. cada uno, siendo su- velocidad periférica de 80 m/seg. Cada dínamo de arranque está-

prevista para 500 voltios y para una intensidad máxima de corriente de 800 amperios, de modo que cada máquina puede desarrollar 400Kw.

Para evitar esfuerzos inadmisibles en las piezas del tren de laminación, durante el funcionamiento, se ha dispuesto un disyuntor de máxima, regulado de tal manera que se desconecta a 900 Kw.

A causa de la inseguridad en la repartición uniforme de la corriente al conectar en paralelo inducidos acoplados mecánicamente, los inducidos de las dos máquinas de arranque y los inducidos de los tres motores están conectados en serie, de modo que la tensión máxima en el circuito de corriente continua llega a 1000 voltios.

El número de revoluciones del grupo convertidor, en servicio normal, oscila entre 275 y 320 rpm y al laminar bloques muy duros disminuye hasta 300 rpm.

La fijación del número de revoluciones y la inversión de marcha de los motores del tren de laminación se verifica por la regulación de la tensión y por el cambio de la polaridad de las máquinas de arranque con el auxilio de un dispositivo de conexión que acciona el regulador en derivación y el conmutador situado en el circuito de la corriente de su arrollamiento inductor. Un convertidor de excitación produce corriente continua a 230 voltios para la excitación de las máquinas y de los motores.

Para que la corriente en las pequeñas sobrecargas quede comprendida entre los límites de graduación del disyuntor de má

xima, los generadores de arranque están provistos de un arrollamiento contracompuñado y los motores del tren de laminación - de un arrollamiento hipercompuesto. Con ello se amortigua la corriente por su mismo crecimiento, aumentando el par motor de los motores del tren de laminación para una intensidad determinada y disminuyendo al mismo tiempo el número de revoluciones - al aumentar la carga, llevando esta disminución como consecuencia una menor potencia necesaria para un par motor determinado, así como una menor potencia necesaria para la aceleración.

Al invertirse la excitación de los generadores, la corriente y la tensión se invierten al mismo tiempo y en consecuencia los arrollamientos de contrapundaje deben conectarse debidamente para cada sentido de aquellos.

En los motores del tren de laminación, al invertirse la corriente la excitación exterior conserva el mismo sentido, habiendo una excitatriz especial para alimentar el arrollamiento en serie, cuya máquina está excitada por la corriente de los motores del tren, y está débilmente saturada, de modo que su tensión entre bornes es aproximadamente proporcional a la tensión de los motores, con lo cual la corriente en dicho arrollamiento es reducida y puede conectarse y desconectarse sin dificultad.

La disposición para la inversión de la corriente en el arrollamiento en serie de los motores del tren está acoplada de tal manera con un reóstato que dicha inversión se produce al invertirse la corriente de excitación del generador de arranque.

Los ensayos realizados demuestran que sin exceder de la intensidad admisible los motores del tren de laminación alcanzarán el número de revoluciones normal de 110 rpm entre 2 y 2 1/2 segundos.

Al laminar bloques con variaciones en los motores del tren

desde 0 a 4000 HP se ha comprobado que la potencia absorbida -- por el motor trifásico sólo oscila unos 50Kw en más o menos de la potencia nominal.

A continuación se dan unas tablas con las características más importantes en función de la potencia de un motor de c.c.

Tabla 1.- Corrientes de arranque para motores de c.c.

Pot. del motor	Constante máxima de proporcionalidad
De 0.75 Kw a 1.5 Kw	2.5
1.5 " 5.0 "	2.0
más de 5Kw	1.7

Tabla 2.- Duración del proceso de arranque en motores de c.c.

Pot. del motor	Duración máxima del proceso de arranque
Menos de 10 Kw	10 segundos
De 10 Kw a 100 Kw	15 "
Más de 100 Kw	30 "

Los trenes de laminación se caracterizan por sus grandes -- variaciones de carga, así como también porque presentan varia--

ciones fuertes de velocidad. En la figura 6-1 observamos un laminador común que consta de un carrete, un molino y arreglo.

El motor M (molino maestro de velocidad) está accionado -- por un generador G y el motor recibe excitación de una red de -- corriente continua. La corriente de excitación es provista por un regulador de campo controlado a partir del reóstato (red de velocidad). Al motor M, para cada tensión aplicada entre los -- bornes de su inducido, le corresponde un número determinado de revoluciones y, además, para cada posición concreta del regulador, se obtiene una tensión distinta. El número de revoluciones del motor M variará según la posición de dicho regulador y, por tanto, el motor M puede llevarse a la velocidad deseada, pararse e invertir su marcha.

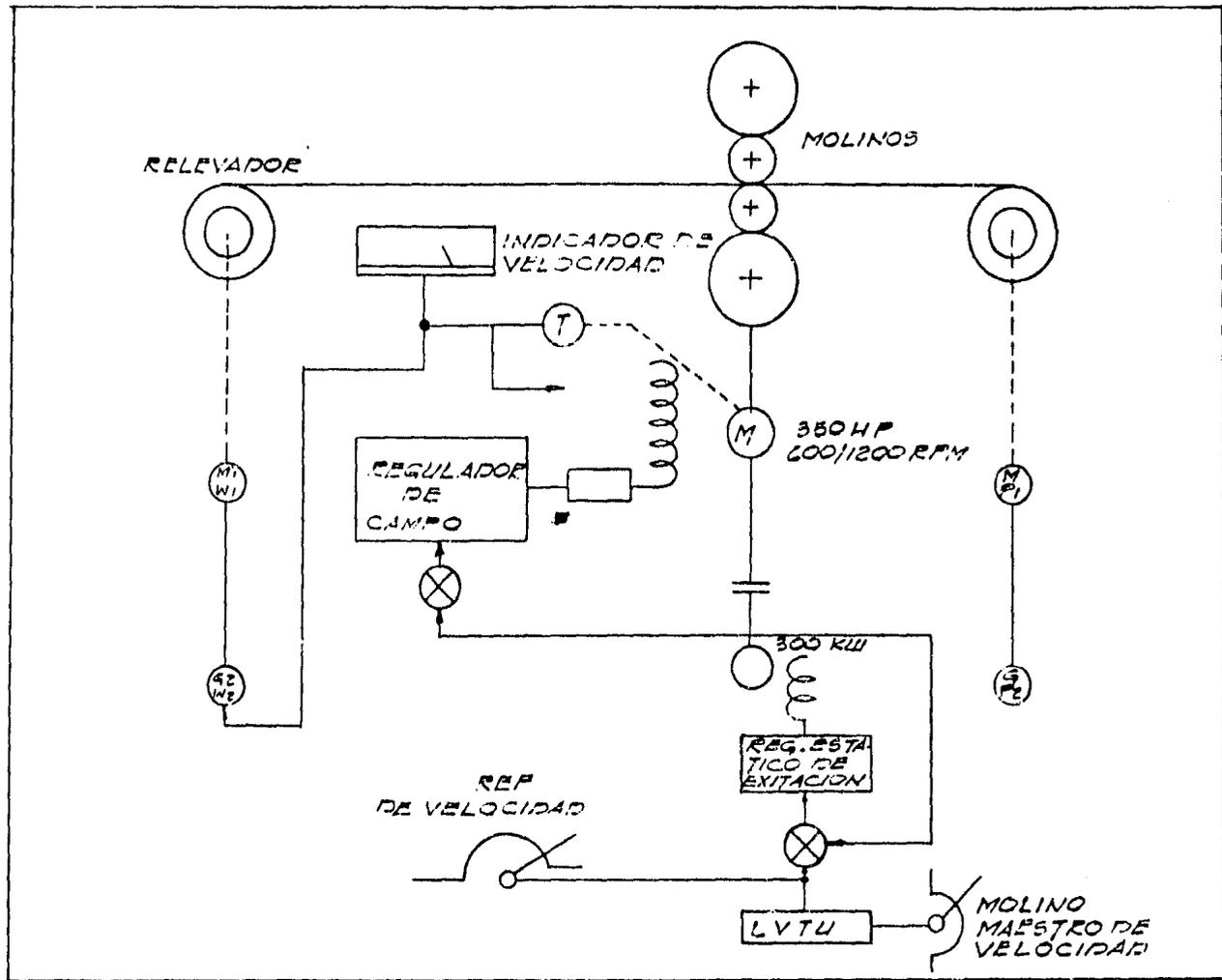
El indicador de velocidad es un transductor de velocidad, -- consiste en un generador que puede dar una tensión proporcional a la velocidad de rotación y recibe el nombre de "Dinamo Taquimétrica".

Al escoger una dinamo taquimétrica es interesante conocer -- aparte de los límites de velocidad de trabajo, la carga que representará al circuito al que irá acoplada, pues influirá en -- gran manera sobre su linealidad.

Modernización de la unidad de molinos.- En primer término -- el tacómetro BC42 (Fig. 6-2) actúa como lazo de realimentación, cambiando una alta gama de velocidad a una tensión proporcio-- nal; en carga se registra un cambio de velocidad y, por consi-- guiente, un cambio de tensión.

Una de las partes importantes del circuito es el circuito -- regulador de corriente S6; utiliza, generalmente, amplificado-- res de corriente, transformador y breaking dinámico, como se ob

FIG. 6-1 Sistema Ward-Leonard (Diagrama de Flujo).





serva en la figura 6-3.

El diagrama del bloque básico S6 contiene unidades de potencia en paralelo; los amplificadores son parte del circuito de marcha y paro secuencial. También contiene referencia de tiempo de voltaje, circuito relevador y comparador.

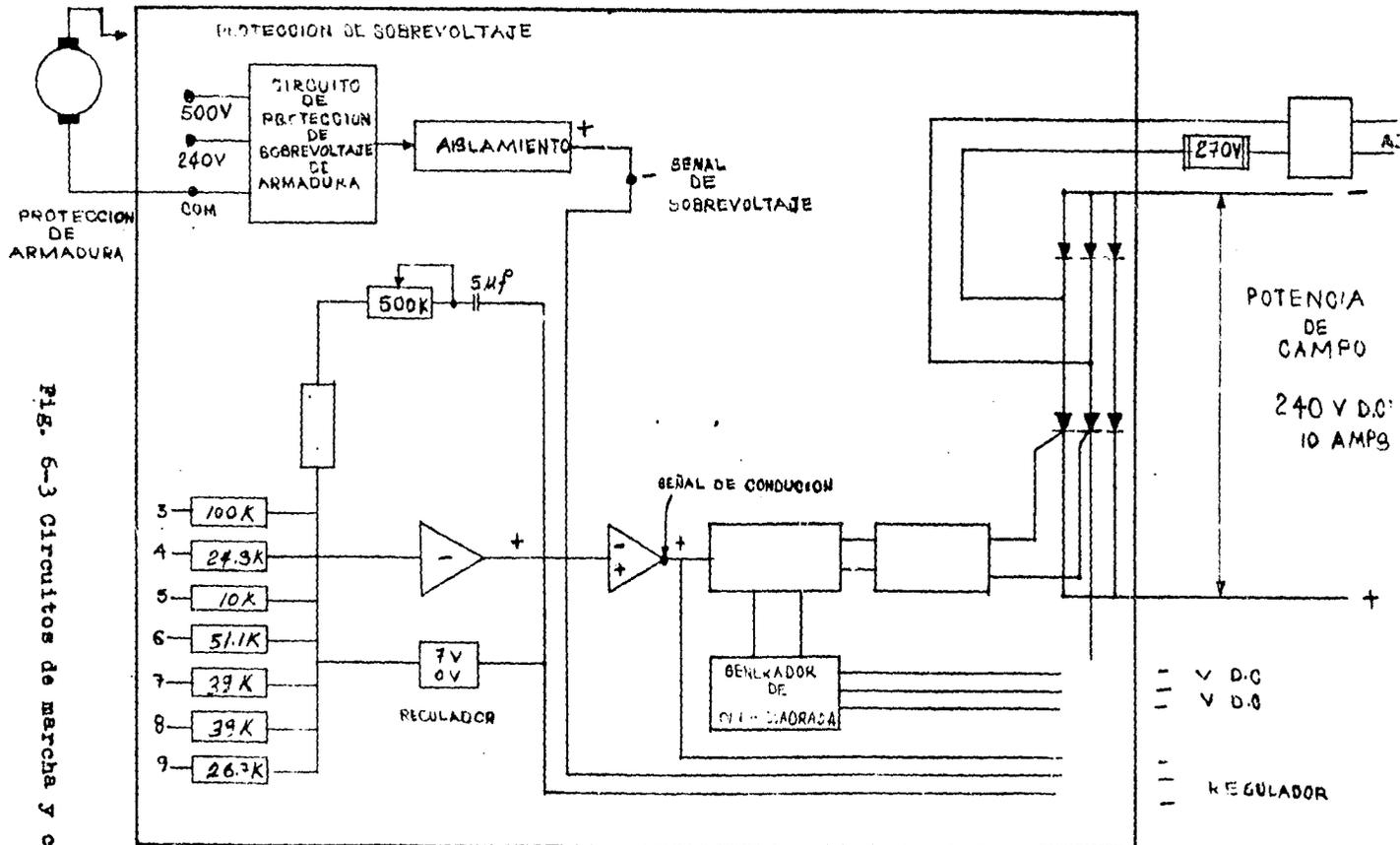


Fig. 6-3 Circuitos de marcha y comparador.

### CONCLUSIONES

El motor de c.c. se puede controlar por campo o por inducido. Para motores de potencia fraccionaria se pueden utilizar resistencias de control, tanto para control por campo como para control por inducido. El efecto Joule es despreciable. Sin embargo, en las instalaciones de laminación los motores deben arrancar y parar constantemente, y como se trata de potencias considerables, de varios cientos de Kw, el arranque por medio de resistencias de control exigiría aparatos muy voluminosos y poco manejables, originando pérdidas considerables, inadmisibles. Para evitarlas se adoptó el sistema Ward-Leonard de control de velocidad.

Este sistema presentó enormes ventajas con respecto al control por resistencia, ya que no requería de disipadores de energía eléctrica (resistencias) para controlar la velocidad. Asimismo, proporcionaba la oportunidad de devolver energía al sistema cuando el motor frenaba y se comportaba como un generador.

Con la aparición de los SCR como elementos de control y comando el sistema Ward-Leonard de control de velocidad tiende a desaparecer debido a su alto costo de instalación y mantenimiento y porque requiere de tres máquinas para hacer el trabajo de una.

Por ser un conmutador casi ideal, rectificador y amplificador a la vez, el tiristor o SCR se ha impuesto rápidamente en -

el dominio de la variación de velocidad de motores de c.c.

El tiristor cumple varias misiones que podemos clasificar un poco arbitrariamente como sigue:

- Rectificación: consiste en usar la propiedad de funcionamiento unidireccional del dispositivo, el cual realiza entonces la función de un diodo;
- Interrupción de corriente: usado como interruptor, el tiristor puede reemplazar a los contactos mecánicos;
- Regulación: la posibilidad de ajustar el momento preciso de accionamiento permite emplear el tiristor para gobernar la potencia o la corriente media de salida;
- Amplificación: puesto que la corriente de mando puede ser muy débil en comparación con la corriente principal, se produce un fenómeno de amplificación en corriente o en potencia.

Aunadas a los cuatro puntos anteriores, la fiabilidad y la precisión, cuyos valores son inalcanzables en dispositivos no electrónicos, nos permiten predecir que el control de la velocidad de motores de c.c. (de cualquier potencia) se hará por medio de SCR. Es decir, el control electrónico será omnipresente.

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

CIRCUITOS ELECTRONICOS: DISCRETOS E INTEGRADOS

DONALD L. SCHILLING y CHARLES BELOVE

EDITORIAL: MARCOMBO

CONTROL DE MOTORES ELECTRICOS

WALTER N. ALERICH

EDITORIAL: DIANA

CONTROL DE MOTORES ELECTRICOS

R. L. McINTYRE

EDITORIAL: MARCOMBO

DISPOSITIVOS Y CIRCUITOS ELECTRONICOS

JACOB MILLMAN y CHRISTOS C. HALKIAS

EDITORIAL: McGRAW HILL

ELECTRONICA Y AUTOMATICA INDUSTRIALES I

SERIE: MUNDO ELECTRONICO

EDITORIAL: MARCOMBO

ELECTROTECNIA

ALEXANDER GRAY y G. A. WALLACE

EDITORIAL AGUILAR

INGENIERIA DE CONTROL MODERNA

KATSUHIKO OGATA

EDITORIAL: PRENTICE/HALL INTERNACIONAL

**TIRISTORES Y TRIACS**

**HENRI LILEN**

**EDITORIAL: MARCOMBO**

**TRENES DE LAMINACION**

**A. I. TSELIKOV y V. V. SMIRNOV**

**EDITORIAL: URMO**