



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

CONTROLES ESTATICOS PARA MOTORES
DE CORRIENTE DIRECTA.

Tesis Profesional

Que para obtener el Título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

p r e s e n t a

GUSTAVO CHAVEZ SOLORIO

México, D. F.

1983



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CONTROLES ESTATICOS PARA MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

INDICE

PROLOGO	Pag.	1
CAPITULO I.- PRINCIPIOS MECANICOS UTILIZADOS	Pag.	2
CAPITULO II.- PRINCIPIOS DE MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA-	Pag.	19
CAPITULO III.- PRINCIPIOS DE ELECTRONICA UTILIZADOS	Pag.	52
CAPITULO IV.- SISTEMAS DE CONTROL ESTATICO	Pag.	82
CAPITULO V .- APLICACION PRACTICA	Pag.	117
BIBLIOGRAFIA.....	Pag.	125

PROLOGO

Actualmente la industria en general, tal como la de producción de papel, de metales, de hule, de vidrio, textiles y otras que necesitan un control de velocidad en su producto específico, utilizan en gran escala los controles estáticos para motores de corriente directa.

Este tipo de controles ha desplazado a los antiguos grupos motogeneradores, como el sistema Ward Leonard para control de la velocidad de los motores de corriente directa a través de un generador de corriente directa manejado a su vez por un motor de corriente alterna. esta sustitución se debe a las muchas ventajas de los controles electrónicos del tipo estático que usan thyristores cada vez más grandes en su capacidad lo que permite manejar cualquier tipo de carga no importa que tan grande sea ésta.

Una gran ventaja son los modernos sistemas de retroalimentación, que hacen más confiable y más exacto el control de la variable que deseamos controlar para satisfacer el proceso en cuestión.

Las variables que usualmente se controlan son; el voltaje de armadura del motor de C.D., la velocidad del mismo, la corriente de armadura, que a su vez controlan indirectamente ya sea la tensión del producto, la posición de algún laze de producto, etc.

En este trabajo se incluyen varios aspectos de este tipo de controles, desde los principios mecánicos para calcular diferentes cargas y poder dimensionar tanto el motor de corriente directa como la capacidad del control estático, así como los principios de funcionamiento de los componentes electrónicos usados y principios de funcionamiento de los motores de corriente directa.

En el capítulo IV se describe ampliamente el funcionamiento interno y externo de los controles estáticos y los principales arreglos utilizados practicamente en la industria. Finalmente en el capítulo V se da un ejemplo práctico para seleccionar todos los componentes de un sistema simple pero aplicable en forma general.

CAPITULO I : PRINCIPIOS MECANICOS UTILIZADOS

FUERZA.- Cuando empujamos o jalamos un cuerpo dado, el mismo tiende a moverse en la dirección de la fuerza, y si son muchas las --- fuerzas que actúan sobre el cuerpo al mismo tiempo, el movimiento resultante será el debido a la combinación de todas las fuerzas aplicadas. El efecto de una fuerza sobre un cuerpo depende de dos factores:

- 1.- la magnitud de la fuerza
- 2.- la dirección de la fuerza

una fuerza dada se puede representar graficamente por una flecha, donde podemos observar la magnitud, la dirección y el punto de aplicación de la fuerza en cuestión. Todas las fuerzas son, ya sea por contacto o acción a distancia, como ejemplo tenemos:

- 1.- peso (W), es la fuerza de gravedad
- 2.- fricción (f), es una fuerza tangencial entre dos superficies de contacto y es proporcional a la fuerza perpendicular normal (N) que presiona las superficies unidas y a la naturaleza (μ) de las superficies cuando la velocidad es constante.

$$f = \mu N \quad \text{donde } \mu = \text{coeficiente de fricción} = f/N$$

El coeficiente de la fricción dinámica es por lo general menor --- que el coeficiente de la fricción estática. La fuerza es una cantidad vectorial.

LEYES DEL MOVIMIENTO DE NEWTON.-

- 1.- un cuerpo permanecerá en reposo, o conservará su movimiento --- uniforme a lo largo de una línea recta a menos que una fuerza actúe sobre dicho cuerpo.
- 2.- una fuerza (F) que actúa sobre un cuerpo le produce una aceleración (a) en la dirección de la fuerza, directamente proporcional a la fuerza e inversamente proporcional a la masa del cuerpo.

$$a = F/m \quad \text{ó bien} \quad F = ma$$

3.- a cada acción o fuerza, corresponde una reacción opuesta y de igual magnitud o fuerza. Este es; si un cuerpo ejerce una fuerza en un segundo cuerpo, entonces el segundo cuerpo ejerce una fuerza numericamente igual y de sentido contrario en el primer cuerpo. Estas dos fuerzas aunque iguales y de sentido contrario, no se balancean entre sí puesto que ambas no son ejercidas en el mismo --- cuerpo.

UNIDADES DE FUERZA.-

En el sistema inglés gravitacional, la unidad de fuerza fundamental es la Libra (Lb) y la unidad de aceleración es el ft/seg^2 , la unidad de masa es derivada y se le llama el slug.

$$F(\text{Lbs}) = m(\text{slugs}) \times a(\text{ft}/\text{seg}^2)$$

$$m = F/a = \text{Lb}\text{-seg}^2/\text{ft} = 1 \text{ slug}$$

MASA Y PESO.-

La masa (m) de un cuerpo está relacionada con su inercia, mientras que el peso (W) de un cuerpo es la fuerza debida a la gravedad y --- varía según la localidad.

Si un cuerpo de masa (m) se deja caer libremente, la fuerza resultante que actúa sobre el cuerpo es su propio peso y su aceleración es debida a la gravedad (g), entonces la ecuación $F = Ma$ se con--- vierte en :

$$W = mg$$

$$W(\text{lbs}) = m(\text{slugs}) \times g(\text{ft}/\text{seg}^2)$$

FRICCIÓN.-

La fuerza que se opone al movimiento de un cuerpo sobre otro se le llama fricción. Un cuerpo que rueda sobre otro encuentra menor --- oposición por fricción que si se deslizara sobre la misma superfi- cie.

La oposición al deslizamiento por la fricción está afectada por tres factores:

- 1.- mientras más rugosas sean las superficies, mayor será la fricción entre ellas, ésta es la causa principal de la fricción.
- 2.- mientras más grande sea la presión que une a las dos superficies, mayor será la fricción entre ellas.
- 3.- La fricción es generalmente mayor cuando las superficies empiezan a deslizarse, que cuando ya están en movimiento.

MOMENTO DE UNA FUERZA.-

El momento de una fuerza é par, alrededor de un eje, es la efectividad de la fuerza en producir rotación alrededor de ese eje, y se mide como el producto de la fuerza por la distancia perpendicular desde el eje de rotación a la línea de acción de la fuerza. Cuando la fuerza se expresa en Libras y la distancia en Pies, la unidad del momento es la Libra-Pie (lb-ft)

$$\text{MOMENTO (lb-ft)} = \text{FUERZA(Lb)} \times \text{DISTANCIA PERPENDICULAR(ft)}$$

MOMENTUM.-

El momentum es una cantidad vectorial que nos indica la cantidad de masa en movimiento. La dirección del momentum es la de su propia velocidad.

$$\text{MOMENTUM DE UN CUERPO} = \text{MASA DEL CUERPO} \times \text{VELOCIDAD} = m v$$

Las unidades para el sistema Inglés son; slug-ft/seg y para el sistema MKS el Kg-m/seg

IMPULSO.-

El impulso es una cantidad vectorial cuya dirección es la misma de su fuerza, las unidades son; para el sistema inglés la Lb-seg y para el sistema MKS el Newton-seg

IMPULSO = FUERZA X TIEMPO EN QUE ACTUA LA FUERZA

El cambio de momentum producido por un impulse es numericamente -- igual al impulse, de esa manera podemos deducir que si una fuerza (F) actúa por un tiempo (t) en un cuerpo de masa (m) cambia su velocidad de un valor inicial V_0 a un valor final V_t entonces:

IMPULSO = CAMBIO EN MOMENTUM

$$F \times t = m \times (V_t - V_0)$$

Esta ecuación nos indica que la unidad de impulse en cualquier -- sistema es igual a la unidad de momentum correspondiente, por lo -- tanto:

$$1 \text{ Lb-seg} = 1 \text{ slug-ft/seg} \quad \text{y}$$

$$1 \text{ Newton-seg} = 1 \text{ Kg-m/seg}$$

TRABAJO.-

La cantidad de trabajo hecho por una fuerza, se encuentra multi-- plicando la fuerza por la distancia que fué movido el cuerpo, la -- distancia debe tomarse en la dirección de la fuerza.

TRABAJO = FUERZA X DISTANCIA

En el sistema inglés la unidad de trabajo es la Lb-ft

POTENCIA.-

La potencia en la mayoría de las máquinas se mide en términos de -- la unidad llamada Caballo de Fuerza (H.P. de Horse Power) que tiene la siguiente equivalencia

$$1 \text{ HP} = 550 \text{ Lb-ft/seg}$$

La potencia de una máquina nos indica la rapidez con la que hace --

trabajo y se puede calcular como sigue:

$$\text{H.P.} = \frac{\text{TRABAJO (Lb-ft)}}{\text{TIEMPO (seg) X 550}}$$

ENERGIA.-

Energía es la capacidad para hacer trabajo, y por lo tanto la cantidad de energía que un cuerpo posee es igual al trabajo que puede hacer si toda su energía fuera usada, por consiguiente las unidades del trabajo y la energía son las mismas.

MULTIPLICACION DEL PAR.-

En un motor que gira a una velocidad constante y que es manejado por una polea o por un tren de engranes, sin considerar las pérdidas por fricción, la potencia entregada por el motor es igual a la de la flecha de salida de la polea o el tren, pero el par de la flecha del motor puede ser mayor o menor que el par en la flecha de salida del tren, esto depende de la relación de velocidades de las flechas. Denominando:

HP_M = potencia entregada por la flecha del motor, en HP

HP_S = potencia en la flecha de salida, en HP

T_M = Par en la flecha del motor, en Lb-ft

T_S = par en la flecha de salida, en Lb-ft

N_M = velocidad de la flecha del motor, en RPM

N_S = velocidad de la flecha de salida, en RPM

La potencia en la flecha del motor será:

$$HP_M = \frac{T_M \times N_M}{5250} \text{-----(1)}$$

Y la potencia en la flecha de salida será:

$$HP = \frac{T_o \times N_o}{5250} \text{-----(2)}$$

Como sabemos la potencia se debe conservar, sin considerar las pérdidas por fricción, por lo que podemos igualar las ecuaciones (1) - y (2)

$$\frac{T_m \times N_m}{5250} = \frac{T_o \times N_o}{5250} \quad \text{ó también} \quad T_m \times N_m = T_o \times N_o$$

Despejando T_o tenemos:

$$T_o = \frac{N_m}{N_o} \times T_m$$

Esta fórmula nos dice que el par de salida para un par de entrada constante, depende de la relación de velocidades entre la flecha -- del motor y la flecha de salida únicamente.

Ejemplo.- consideremos la relación de engranes de la figura I-1, -- el par del engrane A (T_a) será:

$$T_a = F \times R_a = 100 \text{ Lbs.} \times 1 \text{ ft} = 100 \text{ Lb-ft}$$

y el par del engrane B (T_b) será:

$$T_b = F \times R_b = 100 \text{ Lbs.} \times 2 \text{ ft} = 200 \text{ Lb-ft}$$

La fuerza aplicada en el engrane A debe ser la misma para el B ya que están entrelazados mecánicamente, como podemos observar al duplicar el diámetro de un engrane a otro. También duplicamos el par producido de un engrane a otro.

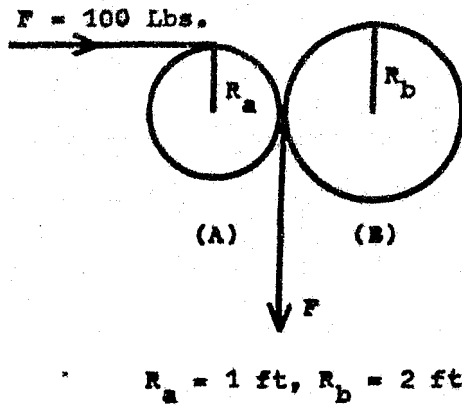


FIGURA I - 1

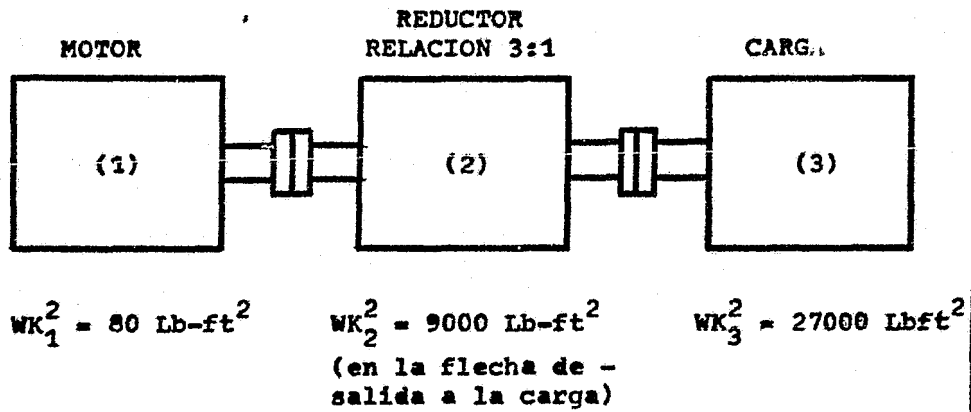


FIGURA I - 2

Ahora observemos lo que sucede con la velocidad de los engranes. suponiendo que el engrane A gire a 1,000 RPM, podemos encontrar la velocidad del engrane B ya que como sabemos :

$$T_a \times N_a = T_b \times N_b$$

y que: $N_a = 1,000$ RPM, $T_a = 100$ Lb-ft, $T_b = 200$ Lb-ft

Por lo tanto despejando N_b de la ecuación anterior tenemos:

$$N_b = \frac{T_a}{T_b} \times N_a = \frac{100 \text{ Lb-ft}}{200 \text{ Lb-ft}} \times 1,000 \text{ RPM} = 500 \text{ RPM}$$

De lo anterior deducimos que la velocidad del engrane B se redujo a la mitad que la del engrane A, en la misma proporción que aumentó el par del engrane B con respecto al A, lo que en última instancia tenemos es una conservación de la potencia, que como sabemos es el producto del par por la velocidad.

Otra manera de deducir esta reducción de velocidad es partiendo del conocimiento de que la velocidad lineal tangencial de ambos engranes debe ser la misma puesto que están acoplados mecánicamente y -- sabiendo que la velocidad tangencial del engrane A es:

$$\text{VELOCIDAD TANGENCIAL } (V_a) = \omega_a \times R_a$$

y la del engrane B es:

$$\text{VELOCIDAD TANGENCIAL } (V_b) = \omega_b \times R_b$$

igualando las ecuaciones anteriores tendremos:

$$V_a = V_b = \omega_a \times R_a = \omega_b \times R_b$$

sabemos que:

$$\omega = \frac{2\pi \times N}{60}$$

las unidades de ω son los rad/seg y los de N las RPM
sustituyendo el valor de

$$\frac{2\pi \times N_a}{60} \times R_a = \frac{2\pi \times N_b}{60} \times R_b \quad \text{ó bien } N_a \times R_a = N_b \times R_b$$

despejando N_b tendremos:

$$N_b = \frac{R_a}{R_b} \times N_a$$

y sustituyendo los valores del ejemplo:

$$N_b = \frac{R_a}{R_b} \times N_a = \frac{1 \text{ ft}}{2 \text{ ft}} \times 1,000 \text{ RPM} = 500 \text{ RPM}$$

que habíamos encontrado anteriormente.

Para encontrar la relación entre el par de cada engrane y sus diámetros tenemos que:

$$\underline{T_a \times N_a = T_b \times N_b} \quad \text{y} \quad \underline{N_a \times R_a = N_b \times R_b}$$

sabemos que el diámetro es igual a dos veces el radio $D = 2R$
entonces podemos escribir la segunda ecuación de arriba como sigue:

$$\underline{N_a \times D_a = N_b \times D_b}$$

Despejando N_a tenemos:

$$N_a = \frac{D_b}{D_a} \times N_b$$

sustituyendo N_a en la ecuación del producto par por velocidad:

$$\underline{T_a \times N_a = T_b \times N_b} \quad \text{ó} \quad T_a \left(\frac{D_b}{D_a} \times N_b \right) = T_b \times N_b$$

podemos eliminar N_b de ambos lados de la ecuación y quedará:

$$\underline{T_b = \frac{D_b}{D_a} \times T_a}$$

La ecuación anterior nos indica que el par de salida para un par de entrada constante depende únicamente de la relación de diámetros de los engranes. Resumiendo las fórmulas que hemos encontrado para los engranes tenemos:

$$\underline{T_b = \frac{N_a}{N_b} \times T_a}$$

$$\underline{T_b = \frac{D_b}{D_a} \times T_a}$$

$$\underline{N_b = \frac{T_a}{T_b} \times N_a}$$

$$\underline{N_b = \frac{D_a}{D_b} \times N_a}$$

ENERGIA CINETICA E INERCIA.-

Cada cuerpo en movimiento tiene almacenada energía cinética, la cual es proporcional a su masa y al cuadrado de su velocidad. Cuando aumentamos la velocidad de un cuerpo, aumentamos la cantidad de energía cinética almacenada en él, y el incremento en energía debe ser proporcionado por la fuente de energía que mueve al cuerpo.

Si disminuimos su velocidad y por consiguiente su energía cinética, la energía perdida por el cuerpo en movimiento debe ser absorbida por alguna parte del sistema.

En un cuerpo en movimiento lineal la energía cinética está dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} m \times V^2 \quad \text{donde } m = \text{masa y } V = \text{velocidad}$$

Para un cuerpo en rotación podemos deducir la fórmula como sigue:
Sabemos que :

$$V = \omega \times K \quad \text{donde } V = \text{velocidad lineal, } \omega = \text{velocidad angular, } K = \text{radio de giro}$$

$$\omega = \frac{2 \times N}{60} \quad \text{donde } N = \text{RPM's}$$

Las unidades son las siguientes; ω = rad/seg, N = RPM'S, V = ft/seg
sustituyendo el valor de ω en la ecuación de la velocidad lineal:

$$V = \frac{2\pi \times N \times K}{60} \quad \text{donde } V = \text{ft/seg}$$

También sabemos que el peso de un cuerpo es W

$$W = m \times g \quad \text{donde } m = \text{masa del cuerpo, } g = \text{constante gravitacional} = 32.2 \text{ ft/seg}^2$$

Despejando la masa (m) tendremos:

$$m = W / g$$

sustituyendo el valor de la velocidad y de la masa en la ecuación original de la energía cinética obtenemos:

$$E_c = \frac{1}{2} \times m \times v^2 = \frac{1}{2} \times \frac{W}{g} \times \left(\frac{2\pi \times N \times K}{60} \right)^2$$

sustituyendo el valor de $g = 32.2 \text{ ft/seg}^2$ nos quedará:

$$E_c = \frac{1}{2} \times \frac{W}{(32.2)} \times \left(\frac{4\pi^2 \times N^2 \times K^2}{3600} \right) = \frac{W \times K^2 \times N^2}{5872}$$

Las unidades de la energía cinética serán las mismas del trabajo - Lb-ft.

$$E_c = \frac{W \times K^2 \times N^2}{5872}$$

donde W = peso en Libras, K = radio de giro en ft, y N = RPM'S

La ecuación anterior nos da la energía cinética para cuerpos que giran alrededor de un eje, como por ejemplo; engranes, poleas, rotores, etc.

Al término $W \times K^2$ también se le conoce como la inercia del cuerpo en rotación.

PAR NECESARIO PARA ACELERAR UN CUERPO EN ROTACION.-

La fuerza requerida para acelerar un cuerpo en reposo, hasta cierta velocidad V en una línea recta, la podemos obtener como sigue:

$$\underline{F = m X a}$$

como sabemos:

$$m = W / g \quad y \quad a = V / t \quad \text{donde } a = \text{aceleración y } \text{-----}$$

$$t = \text{tiempo}$$

sustituyendo estos valores en la ecuación de la fuerza tendremos:

$$F = \frac{W}{g} X \frac{V}{t} = \frac{W X V}{32.2t}$$

Las unidades son; W = Libras, V = ft/seg, t = seg

El par necesario (T) para acelerar un cuerpo giratorio en reposo - hasta cierta velocidad N en RPM'S alrededor de su eje lo encontraremos a continuación.

como sabemos:

PAR = FUERZA X DISTANCIA

$$T = F X D$$

Como trataremos con cuerpos giratorios, llamaremos a la distancia - radio del cuerpo como radio de giro (K) = (D), entonces tendremos

$$T = F X K$$

sustituyendo en la ecuación anterior los valores encontrados para - la fuerza tenemos:

$$F = \frac{W X V}{32.2t} \quad \text{pero} \quad V = \frac{2\pi X N X K}{60}$$

$$T = \left(\frac{W X V}{32.2t} \right) X K = \left(\frac{W X (2\pi X N X K / 60)}{32.2t} \right) X K =$$

finalmente encontremos que:

$$T = \frac{W \times K^2 \times N}{308 \times t} \quad \text{las unidades son Lb-ft}$$

La ecuación anterior nos indica que el par necesario en Lb-ft para acelerar un cuerpo en reposo, cuya inercia es $W \times K^2$, hasta una velocidad N en RPM'S durante un tiempo t en segundos es el dade por dicha ecuación.

INERCIA (WK^2) EQUIVALENTE.-

Prácticamente en todos los sistemas mecánicos, las partes rotatorias no siempre operan a la misma velocidad del motor, por lo que comúnmente se calcula una inercia WK^2 equivalente de todo el sistema que manejará el motor, para simplificar los cálculos de aplicación.

Este procedimiento se realiza calculando la inercia de todas las partes que giran en sus respectivas velocidades y buscando una inercia equivalente para una velocidad igual a la del motor, después se suman todas las inercias involucradas y el resultado será la inercia equivalente de todo el sistema.

Para hacer dicha conversión nos valdremos de la siguiente relación:

$$WK^2 \text{ equivalente} = WK_{eq}^2 = WK_p^2 \left(\frac{N_p}{N_m} \right)^2$$

Donde N_p son las RPM'S de la parte que gira en cuestión, WK_p^2 es la inercia de la misma parte y N_m son las RPM'S en la flecha del motor.

La inercia WK^2 de un cuerpo se obtiene conociendo la naturaleza del material del cuerpo, y su forma de la cual depende el radio de giro

Existen ciertos manuales donde podemos encontrar estos datos ----- para una aplicación práctica. A continuación presentamos un ejemplo de cálculo de WK^2 equivalente.

En la figura I-2 se tiene el arreglo donde se indica la inercia correspondiente de cada parte.

Como sabemos ya:

$$WK_{eq}^2 = WK_p^2 \left(\frac{N_p}{N_m} \right)^2$$

llamando a las tres partes de la figura con subíndices tenemos:

$$WK_{eq}^2 = WK_1^2 \left(\frac{N_1}{N_m} \right)^2 + WK_2^2 \left(\frac{N_2}{N_m} \right)^2 + WK_3^2 \left(\frac{N_3}{N_m} \right)^2$$

Los datos que tenemos en la figura son los siguientes:

$$WK_1^2 = 80 \text{ Lb-ft}^2 = \text{inercia del motor}$$

$$WK_2^2 = 9,000 \text{ Lb-ft}^2 = \text{inercia del reductor, lado carga}$$

$$WK_3^2 = 27,000 \text{ Lb-ft}^2 = \text{inercia de la carga}$$

También vemos que el reductor tiene una relación de reducción de --
3 : 1

Por lo tanto la velocidad de la carga y del reductor en su flecha -
acoplada a la carga será:

$$N_2 = N_3 = N_m / 3$$

sustituyendo en la ecuación de WK_{eq}^2 los valores conocidos:

$$WK_{eq}^2 = 80 \left(\frac{N_m}{N_m} \right)^2 + 9000 \left(\frac{N_m/3}{N_m} \right)^2 + 27000 \left(\frac{N_m/3}{N_m} \right)^2$$

$$WK_{eq}^2 = 80 (1)^2 + 9000 (1/3)^2 + 27000 (1/3)^2$$

$$WK_{eq}^2 = 80 + 1000 + 3000 = 4080 \text{ Lb-ft}^2$$

$$\underline{WK_{eq}^2 = 4,080 \text{ Lb-ft}^2}$$

Para el ejemplo anterior podemos calcular también el par necesario - para acelerar al sistema mediante la fórmula que ya habíamos encontrado;

$$T = \frac{WK^2 N}{398t}$$

Suponiendo que el sistema requiera acelerarse hasta una velocidad - de 1750 RPM'S en 30 segundos tenemos que:

$$T = \frac{4080 \times 1750}{398 \times 30} = 772.73 \text{ Lb-ft}$$

Con este valor podemos calcular los HP que deberá manejar el motor durante la aceleración con la fórmula que ya conocíamos:

$$HP = \frac{T \times N}{5250} \quad \text{donde } T = \text{Lb-ft, y } N = \text{RPM'S}$$

sustituyendo el valor encontrado para el par $T = 772.73 \text{ Lb-ft}$ en - la ecuación de la potencia tenemos:

$$HP = \frac{772.73 \times 1750}{5250} = 257.6$$

Por lo tanto la potencia necesaria será igual a 257.6 HP.
 Los HP también los podemos calcular directamente como sigue:

$$HP = \frac{T \times N}{5250} = \text{pero } T = \frac{WK^2 N}{308t}$$

$$HP = \frac{WK^2 N}{308t} \times \frac{N}{5250} = \frac{WK^2 N^2}{1.617 \times 10^6 t}$$

$$HP = \frac{WK^2 N^2}{1.617 \times 10^6 t}$$

En la práctica este es precisamente el método para dimensionar la capacidad del motor, para hacer más real el ejemplo supongamos --- que se tiene un 10 % de pérdidas en el sistema, por lo tanto:

$$HP = 257.6 + 257.6 \times 0.1 = 283.36$$

Para este ejemplo podemos utilizar un motor de corriente directa - de 200 HP, debido a que estos motores pueden suministrar el 150 % de par a plena carga durante un minuto. O lo que es lo mismo, un - motor de 200 HP puede entregar 300 HP por un minuto lo que satis-- face nuestras necesidades de 283.36 HP durante 30 segundos.

Si usamos un motor de corriente alterna, los cuales proporcionan - 100 % de par a plena carga, deberemos usar un motor de 300 HP.

CAPITULO II : PRINCIPIOS DE MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

PRINCIPIOS BASICOS.-

Cuando una corriente eléctrica circula por un conductor, se produce un campo magnético formado por líneas de flujo o fuerza alrededor del conductor, como se puede ver en la figura II-1.

En dicha figura se observa el sentido de las líneas de fuerza alrededor del conductor y el sentido de la corriente i , nosotros utilizaremos convencionalmente la regla de la mano izquierda, la cual consiste en que mientras el dedo pulgar señala el flujo de la corriente (flujo de electrones), los dedos restantes señalarán el sentido de las líneas de fuerza.

FORMACION DE UNA BOBINA.-

Podemos obtener un campo magnético de dos formas; ya sea con un imán permanente o con un electroimán. El último de ellos se forma con una bobina y un núcleo de hierro ó acero.

Como sabemos, un imán consta de dos polos magnéticos opuestos llamados polo norte y polo sur, también sabemos que convencionalmente las líneas de fuerza viajan por el exterior del imán del polo norte al polo sur. La manera de lograr un campo magnético similar es enrollando un conductor y suministrándole corriente eléctrica que producirá dicho campo. El sentido del flujo magnético se puede deducir de la regla de la mano izquierda como se ve en la figura II-2 Aunque la fuerza del campo magnético de un electroimán se incrementa aumentando ya sea la magnitud de la corriente o el número de vueltas de la bobina, se necesita un núcleo de hierro o acero en la misma, para reducir la reluctancia (oposición al paso del flujo magnético) y poder concentrar lo suficiente el campo para usarse prácticamente en un motor.

Un electroimán con núcleo de hierro o acero retiene del 2 al 3 % de su flujo, debido a la característica de histéresis de el hierro. A este efecto se le llama flujo residual.

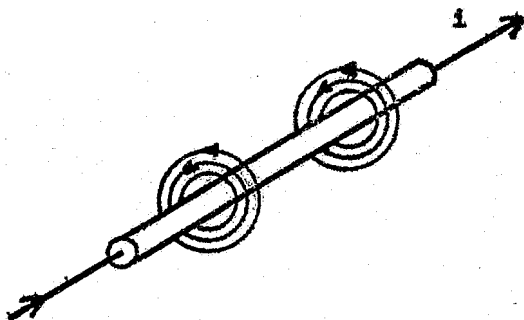


FIGURA II - 1

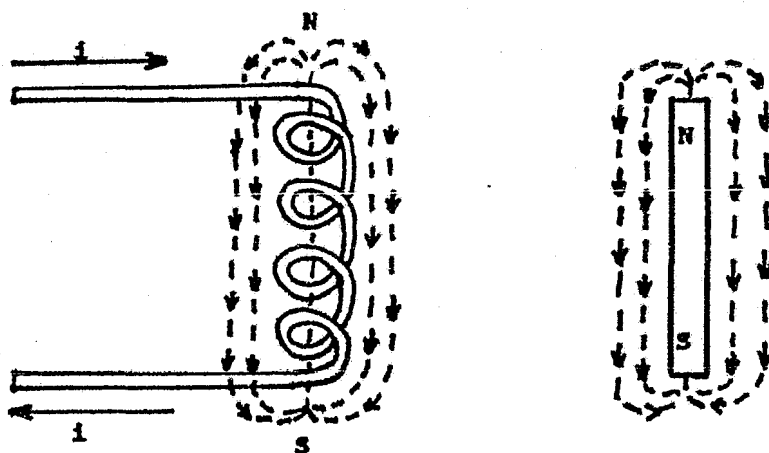


FIGURA II - 2

PRODUCCION DE FUERZA MOTRIZ.-

Si un conductor por el que circula una corriente se coloca dentro de un campo magnético, las líneas de fuerza producidas por el conductor se suman a las del flujo principal en un lado y se contrarrestan por el otro extremo, como se ve en la figura II-3.

Debido a ello se produce una fuerza motriz que tratará de mover al conductor hacia el lado donde el flujo se contrarrestó, dicha fuerza es proporcional a la densidad de flujo del campo magnético principal, a la corriente y a la longitud del conductor, como se puede ver en la siguiente fórmula:

$$F = Bil \quad \text{donde } F = \text{fuerza producida, } B = \text{densidad de flujo, } i = \text{corriente en el conductor y } l = \text{longitud del conductor}$$

A este efecto se le llama acción motriz y es el que origina que un motor eléctrico gire. A el número de líneas de fuerza por unidad de área se le llama densidad de flujo.

$$B = \phi / A \quad \text{donde } \phi = \text{flujo magnético, } A = \text{área transversal}$$

Para aprovechar este principio prácticamente en un motor de corriente directa, se forman espiras con el conductor. Al conjunto de espiras que van montadas en el rotor se le llama armadura.

Para efectos de comprensión veremos una sola espira dentro de un campo magnético, suponiendo que la espira puede girar sobre sí misma y alimentándole una corriente, como se observa en la figura II-4. Puesto que las corrientes en las dos ramas de la espira están en sentido opuesto, las fuerzas producidas en las ramas tendrán sentido contrario y la espira tenderá a girar.

Debido a que las dos ramas de la espira intercambiarían de posición al girar 180 grados, y si mantuvieramos el sentido original de la corriente en cada rama, el par de rotación se invertiría, por lo

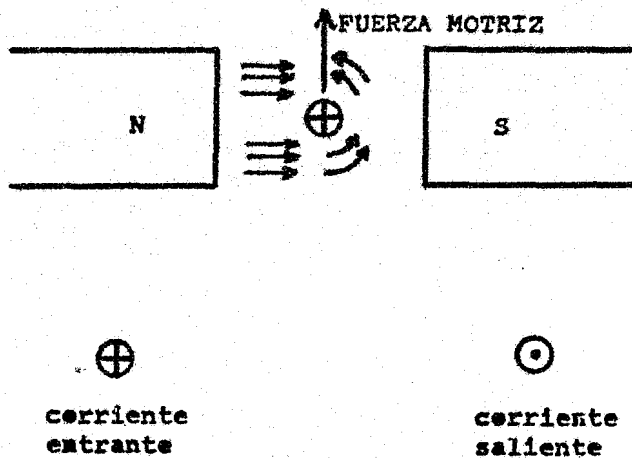


FIGURA II - 3

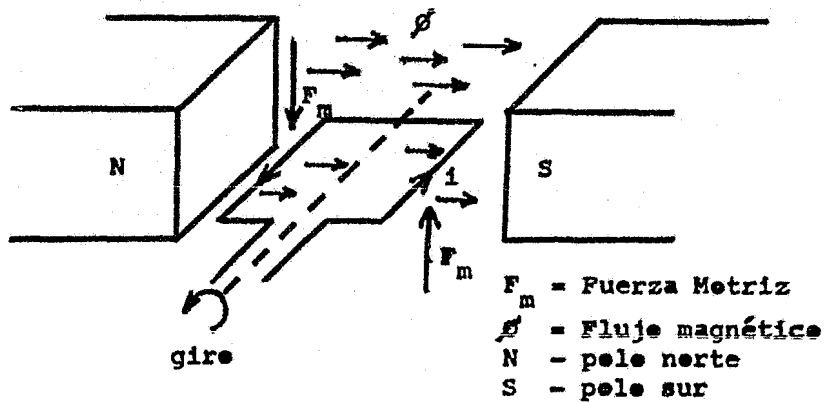


FIGURA II - 4

que necesitemos de un dispositivo que independientemente de que la rama esté a la derecha o a la izquierda de un plano vertical imaginario en el centro de la espira, nos produzca siempre un par de rotación en el mismo sentido, a este dispositivo se le conoce como -- conmutador.

Lo que hace el conmutador es proporcionar un solo sentido de la corriente para el grupo de espiras que se encuentran en un momento -- dado, hacia la derecha del plano vertical imaginario, y una co----- rriente de sentido opuesto a las espiras que se encuentran a la izquierda.

El conmutador es un conjunto de delgas o barras de cobre que está -- mentado en el rotor, las delgas están conectadas a las espiras en -- forma fija. Para suministrar la corriente a las espiras se utilizan escobillas de carbón fijas en el espacio, que hacen contacto con -- las delgas del conmutador.

En la figura II-5 se aprecia un conmutador de solo dos delgas para una espira.

ECUACION DE UN MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA.--

En un generador de corriente directa, el voltaje es generado al --- existir un movimiento de los conductores de las espiras, que cortan las líneas de flujo del campo magnético. Un motor de corriente di-- recta presenta el mismo efecto ya que se genera un voltaje en la -- armadura, de polaridad opuesta al voltaje aplicado en la armadura. A ese voltaje se le llama fuerza contraelectromotriz (FCEM). La --- ecuación para un motor de c. d. es:

$$V_t = FCEM + I_a \times R_a$$

donde V_t = voltaje terminal, FCEM = fuerza contraelectromotriz, ---
 I_a = corriente de armadura, R_a = resistencia de armadura.
La fuerza contraelectromotriz del motor la podemos expresar como:

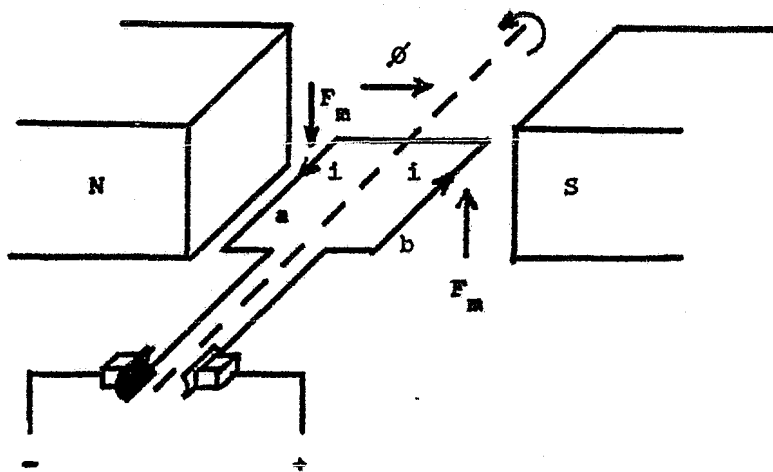
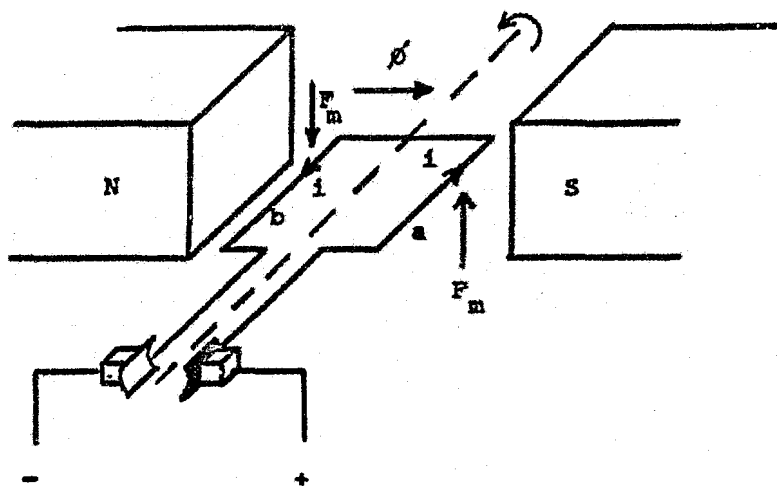


FIGURA II - 5

$$FCEM = K_m \times \phi \times N$$

donde K_m = constante de construcción del motor, ϕ = flujo magnético y N = velocidad de rotación.

La ecuación del par desarrollado por el motor de corriente directa es la siguiente:

$$T = K \times \phi \times I_a$$

donde T = par, K = constante de diseño del motor que depende del número de polos y el número y arreglo de los conductores en la armadura, ϕ = flujo total del entrehierro por polo, I_a = corriente de armadura.

ARRANQUE Y ACELERACION.-

Los motores de C.D. se clasifican por el tipo de devanado de campo que usan, el más común es el que tiene conexión paralelo o en derivación, la cual consiste en muchas vueltas de alambre delgado conectado generalmente a una fuente de voltaje constante para producir el flujo magnético donde se moverá la armadura. La armadura se conecta ya sea a la misma fuente, o a otra diferente.

La corriente que fluye por el campo devanado produce un flujo magnético y la magnitud de ella depende de la resistencia del devanado y como por lo general la fuente de voltaje es constante, la corriente de campo también lo es y por consiguiente el flujo magnético.

Cuando el circuito de la armadura se cierra, se forma una corriente de gran magnitud, limitada solamente por la resistencia de la armadura:

$$I_a = V_t / R_a$$

Puesto que el circuito de armadura consiste de pocas vueltas de --

alambre de calibre grueso, su resistencia es muy baja y por ello -- la corriente en la armadura es muy alta. Una vez cerrado el circuito el motor comienza a girar ya que se tienen las dos condiciones -- para que ello ocurra como son; flujo magnético y corriente de armadura y como sabemos el par desarrollado por la máquina es proporcional al flujo magnético y corriente de armadura ($T = K\phi I_a$). Debido a que la corriente I_a es alta, el par inicial será alto, lo que produce una aceleración muy rápida de la armadura. Al comenzar a girar se empieza a generar la fuerza contraelectromotriz (FCEM) ya que depende en forma proporcional de la velocidad de la armadura ($FCEM = K_m \phi N$). A medida que la FCEM crece, el voltaje neto disponible para forzar la corriente en la armadura disminuye y debido a ello también disminuye la corriente, por consiguiente el par y -- la aceleración decrecen. La velocidad y la FCEM continúan aumentando pero a un ritmo menor, la corriente y el par continúan de-- creciendo hasta que finalmente se llega a una situación de estado estable, en la cual la velocidad es la adecuada para desarrollar -- una FCEM suficiente para limitar la corriente y por ello el par -- que mantenga la rotación.

La característica más importante de un motor de C.D. es que el par que desarrolla, siempre es igual al par de la carga que maneja.

EFFECTOS DE CAMBIOS EN LAS VARIABLES DE UN MOTOR DE C.D.--

Cambio en el par de la carga,--

Cuando hay un cambio en el par de la carga, se produce una nueva -- condición de estado estable en la velocidad, la corriente y el par del motor. Un incremento en el par de la carga origina que la velocidad del motor disminuya y viceversa, esto debido a que la co---- rriente de armadura es proporcional al par del motor, y a que generalmente el flujo es constante.

Cambio en el voltaje aplicado.--

Si el par de la carga, o carga solamente y el flujo se mantienen -- constantes, y el voltaje de armadura se reduce, la velocidad del --

motor disminuirá. Esto se deduce observando la ecuación del motor:-

$$V_t = K_m \phi N + I_a R_a$$

despejando la velocidad N tenemos:

$$N = \frac{V_t - I_a R_a}{K_m \phi}$$

Puesto que el par de la carga y el flujo se mantienen constantes, - la corriente de armadura se mantendrá constante ya que es propor- cional al par de la carga, $T = K\phi I_a$, por lo tanto la velocidad de- pendería directamente del voltaje aplicado, bajo estas condiciones. Cambio en el flujo magnético del campo.-

Si la corriente de armadura y el voltaje aplicado se mantienen ---- constantes y se reduce el flujo magnético, la velocidad del motor - aumentará, examinando nuevamente la fórmula vemos la razón.

- físicamente el flujo magnético se reduce incrementando la resis- tencia del campo devanado, mediante un reóstato en serie con el --- mismo, o mediante un regulador electrónico. Al hacer esto disminuye la corriente de excitación y como el flujo es proporcional a ella, es reducido también, como se ve en la siguiente fórmula:

$$\phi = Li \quad \text{donde } L = \text{autoinducción del campo, } i = \text{co-} \text{---} \text{ rriente de excitación.}$$

Es importante hacer notar que incrementando la velocidad del motor al debilitar el campo, el par máximo disponible se reduce ya que -- la fórmula dice que $T = K\phi I_a$. Debido a lo anterior, la corriente - de armadura debe incrementarse proporcionalmente a lo que fué debi- litado el campo para entregar el par demandado por la carga.

ECUACION DE LA POTENCIA DE CUALQUIER TIPO DE MOTOR.-

La potencia mecánica de un motor generalmente es expresada en caballos de fuerza (Horse Power = H.P.) y la podemos obtener de la siguiente fórmula:

$$\text{POT. (H.P.)} = \frac{TN}{5250} \quad \text{donde T = par en Lb-ft y N = RPM'S}$$

CONEXIONES Y CURVAS DE MOTORES DE C.D.-

Los motores de C.D. se pueden clasificar de acuerdo a la conexión de sus devanados, como sigue:

- 1.- conexión en Derivación y en Derivación estabilizada
- 2.- conexión compuesta
- 3.- conexión serie y serie estabilizada

A continuación las describiremos brevemente.

CONEXION EN DERIVACION Y EN DERIVACION ESTABILIZADA.-

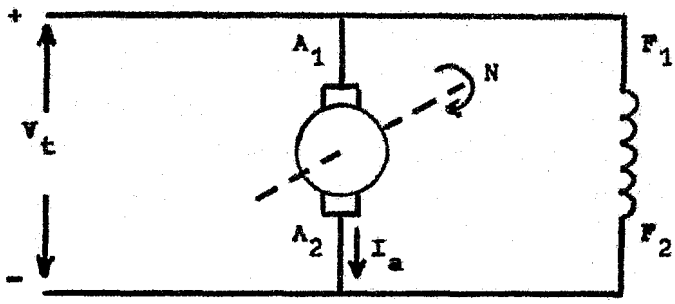
Los motores en derivación pueden ser autoexcitados o excitados separadamente, un motor en derivación estabilizada es en realidad un motor compuesto con un campo serie muy débil por lo que las características predominantes son las del motor en derivación.

En la figura II-6 se muestran éstas conexiones. Las terminales marcadas como A_1 y A_2 corresponden al circuito de armadura y las marcadas como F_1 y F_2 al circuito de campo.

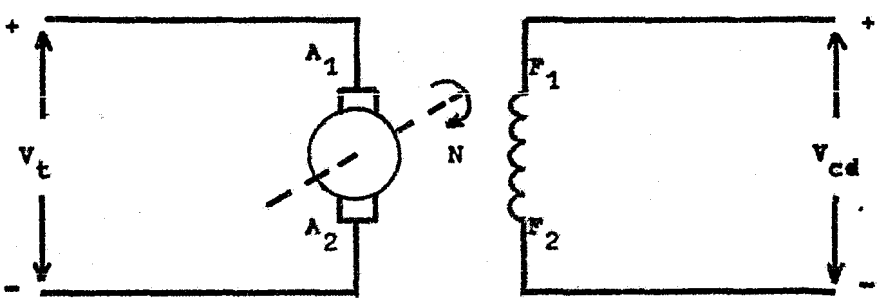
La curva característica de velocidad contra carga se puede deducir de la fórmula del motor de C.D. ya conocida:

$$V_t = K_m \phi N + I_a R_a$$

Para un motor en derivación $\phi = \text{constante}$ y cuando la corriente de



MOTOR AUTOEXCITADO EN DERIVACION



MOTOR EN DERIVACION CON EXCITACION
SEPARADA

FIGURA II - 6

armadura decrece desde plena carga a vacío, la velocidad debe incrementarse proporcionalmente para que aumente la FCEM y la ecuación - tenga balance.

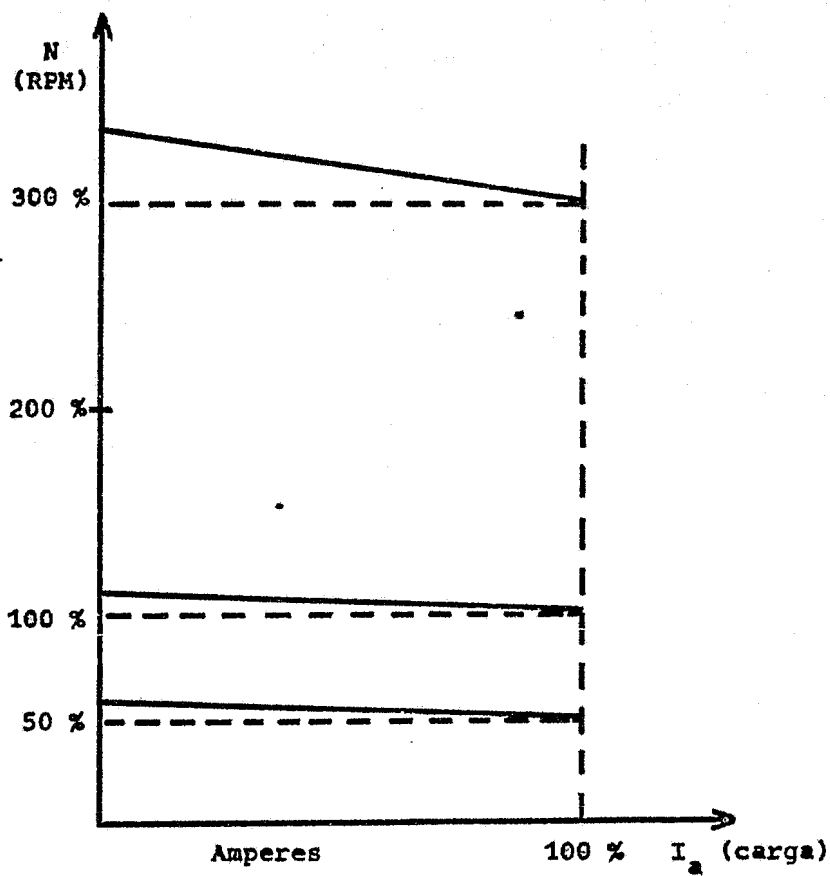
Para voltaje nominal aplicado y campo pleno, la velocidad del motor aumentará cerca del 5 % cuando la corriente de carga disminuya de - plena carga a vacío. La curva característica para un motor en derivación estabilizada se puede ver en la figura II-7.

REACCION DE ARMADURA.-

La corriente que circula por los conductores de la armadura, producen un flujo magnético que se agrega al flujo principal en el entrehierro bajo un polo y se resta en el otro polo. El flujo magnético creado por la corriente de armadura se distorsiona y puede reducir el flujo del entrehierro, ocasionando con ello que se incremente la velocidad. La reacción de armadura produce un ligero debilitamiento en el flujo magnético del campo cuando la corriente de carga aumenta, esto tiende a aumentar la velocidad del motor. Para cargas normales el efecto de reacción de armadura es insuficiente para contrarrestar la caída de velocidad debida a la resistencia de armadura, - por lo que el efecto neto es un decremento en velocidad desde el -- vacío, hasta plena carga.

Cuando existen sobrecargas muy grandes, el efecto de reacción de -- armadura puede vencer al efecto de la resistencia de armadura, con - lo que la velocidad del motor se incrementará con carga creciente. A este efecto no deseado se le llama inestabilidad.

Para vencer la inestabilidad inherente de un motor en derivación, se conecta un campo serie débil y se devana sobre el devanado de -- campo derivado, el flujo del campo serie se incrementa con la co--- rriente de carga y compensa el efecto de reacción de armadura, dando un motor estable con una característica de velocidad decreciente para todas las cargas, por ello al devanado serie se le llama campo estabilizador y al motor un motor en derivación estabilizado. Cuando el campo en derivación del motor es debilitado para aumentar la



GRAFICA RPM-AMPS DE UN MOTOR
EN DERIVACION ESTABILIZADO.

FIGURA II - 7

velocidad, el flujo del campo serie tiene una mayor participación en el flujo total, de tal manera que cuando aumenta la corriente de carga, es mayor el porcentaje en la pérdida de velocidad que anteriormente.

CONEXION SERIE Y SERIE ESTABILIZADA.-

En un motor serie, el flujo del campo es una función de la corriente de carga y de la curva de saturación del motor. Cuando la corriente de carga disminuye a partir de plena carga, el flujo disminuye y la velocidad aumenta, la razón del incremento de la velocidad es pequeña al principio pero se eleva cuando la saturación es reducida. Para cada motor serie hay una mínima carga segura, determinada por la máxima velocidad segura de operación.

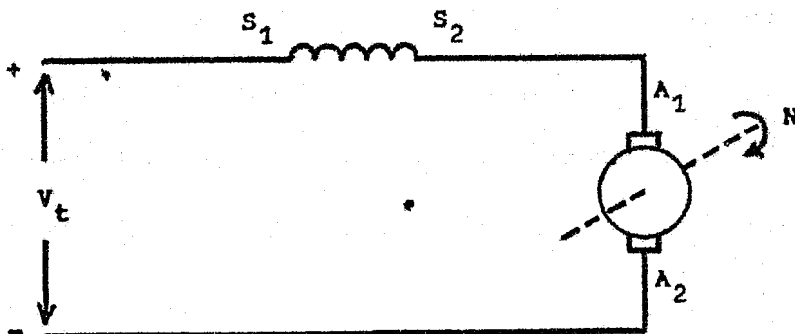
Un motor serie estabilizado es en realidad un motor compuesto con un campo derivado muy débil, de tal manera que su característica predominante es la de un motor serie. En la gráfica II-8 podemos observar la conexión serie y la gráfica de la curva velocidad-corriente de carga de este tipo de motores en la figura II-9.

CONEXION COMPUESTA.-

Un motor compuesto tiene una característica de velocidad que no es plana como un motor derivado, ni pronunciada como un motor serie, tiene una velocidad de vacío sin carga y una gran caída de velocidad. A un motor estandar compuesto no se le debilita el campo, puesto que existe el peligro de exceder la máxima velocidad segura de el motor cuando no tiene carga. Los motores compuestos invariablemente se conectan con polaridad aditiva, ya que la polaridad diferencial es muy inestable y peligrosa. En la figura II-10 se muestra la conexión compuesta, y en la figura II-11 la curva característica de velocidad-carga.

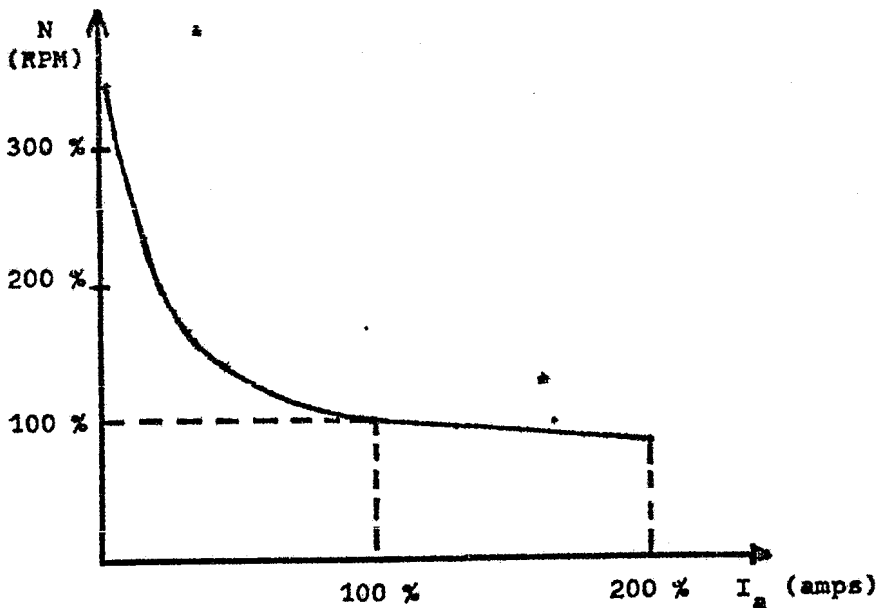
REGULACION DE VELOCIDAD.-

Regulación de velocidad es el término usado para describir las ca-



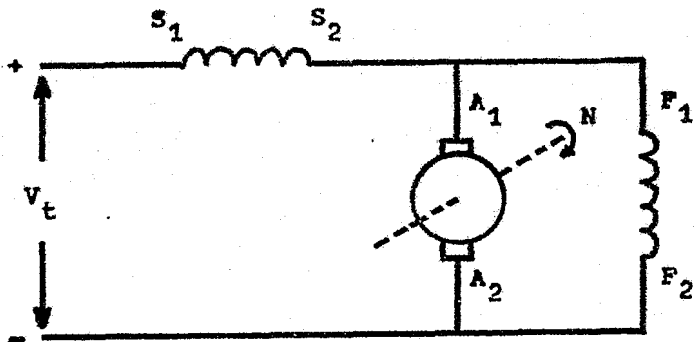
MOTOR SERIE

FIGURA II - 8



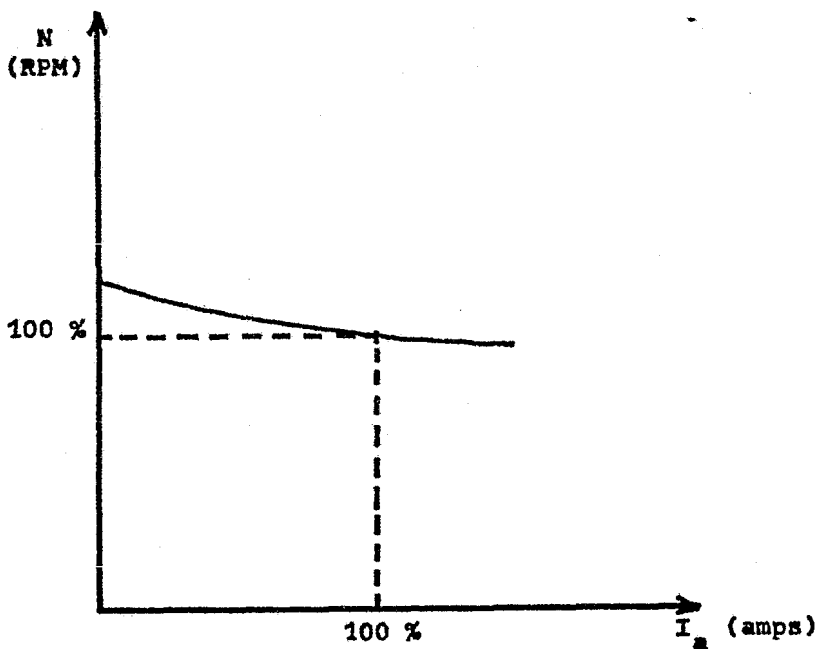
GRAFICA RPM-AMPS DE UN MOTOR SERIE

FIGURA II - 9



MOTOR COMPUESTO

FIGURA II - 10



GRAFICA RPM-AMPS MOTOR COMPUESTO

FIGURA II - 11

racterísticas carga-velocidad de un motor de C.D. y se define como:

$$\% \text{ Reg. de vel.} = \frac{\text{vel. sin carga} - \text{vel. plena carga}}{\text{vel. plena carga}} \times 100$$

De la ecuación general del motor de C.D., $V_t = K\phi N + I_a R_a$ puede verse que el único término en que se encuentra la velocidad (N) es en la FCEM ($K\phi N$), por consiguiente se puede obtener con una razonable exactitud, una medida de la regulación de velocidad de un motor de C.D. observando lo que ocurre con la FCEM bajo condiciones de carga variable.

Ejemplo.- dadas las siguientes condiciones:

$$V_t \text{ nominal} = 200 \text{ volts}$$

$$I_a \text{ nominal} = 15 \text{ amperes}$$

$$\text{velocidad base (N)} = 1,750 \text{ RPM}$$

$$R_a = 1 \text{ ohm}$$

pérdidas por fricción y ventilación = 5 % de la carga plena nominal

Análisis a plena carga:

$$V_t = K\phi N + I_a R_a$$

$$K\phi N = V_t - I_a R_a$$

$$K\phi N = 200 - 15(1) = 185 \text{ volts}$$

Análisis sin carga:

$$K\phi N = V_t - I_a R_a$$

$$I_a = 5 \% \text{ de } 15 \text{ amperes} = 0.75 \text{ amps.}$$

$$K\phi N = 200 - 0.75(1) = 199.25 \text{ volts}$$

Debido a que en la fórmula de $FCEM = K\phi N$, K y ϕ son constantes, - lo que realmente cambia es la velocidad N , por lo que si a plena -- carga 185 volts son proporcionales a 1750 RPM, sin carga 199.25 --- volts deben ser proporcionales a una cierta velocidad en vacío. Por lo tanto:

$$\frac{1750 \text{ RPM}}{185 \text{ volts}} = \frac{\text{vel. vacío}}{199.25 \text{ volts}}$$

$$\text{vel. vacío} = \frac{199.25}{185} (1750) = 1884 \text{ RPM'S}$$

sustituyendo ahora en la ecuación de la regulación de velocidad:

$$\% \text{ Reg. vel.} = \frac{\text{RPM vacío} - \text{RPM carga plena}}{\text{RPM carga plena}} \times 100$$

$$\% \text{ Reg. vel.} = \frac{1884 - 1750}{1750} \times 100 = 7.66 \%$$

La regulación de velocidad nos sirve para conocer la capacidad del motor de mantener una velocidad constante con carga variable, por - lo que será mejor un motor de C.D. mientras más bajo sea el % de -- regulación de velocidad. Generalmente para obtener una buena regu-- lación de velocidad con carga variable, se debe emplear un esquema con algún tipo de regulador.

PAR DEL MOTOR DE C.D.--

El motor de C.D. se dice que es un dispositivo que siempre mantie-- ne un par igual al de la carga mecánica, ya que si el motor produ-- jera mayor par que el de la carga demandada, la velocidad se incre-- mentaría hasta el infinito, por otro lado si el par del motor fuera menor que el demandado por la carga mecánica, la velocidad dismi---

nuiría hasta cero.

De aquí podemos deducir que para acelerar un motor de C.D. bajo carga, el motor debe suministrar un exceso de par durante el período de aceleración, por lo que se debe esperar que la corriente de armadura sea mayor durante la aceleración del motor que cuando trabaja en estado estable. Es debido a este y a condiciones mecánicas que generalmente se proporciona un circuito limitador de corriente en los controles estáticos de C.D.

De la ecuación del par de un motor de C.D., $T = K\phi I_a$, se puede observar que el par desarrollado por un motor en derivación, varía directamente con la corriente de carga puesto que el flujo es constante. Para un motor serie el flujo varía con la corriente de carga, excepto para el efecto de saturación, de tal manera que su par varía con el cuadrado de la corriente de carga aproximadamente. El motor compuesto tiene una característica de par entre el motor en derivación y el motor serie.

INTERPOLOS.-

En un motor de C.D., las bobinas o espiras de la armadura que se encuentran físicamente en un eje perpendicular al eje donde se encuentran los polos principales, idealmente no tendrían inducción de voltaje, pero debido a la corriente de armadura del motor, se introduce una distorsión en el campo magnético principal, lo que ocasiona que si haya inducción de voltaje, llamado voltaje reactivo en dichas bobinas, provocando arcos eléctricos ó chisporroteo al conmutar las escobillas de una barra a otra del conmutador. Este efecto es altamente indeseable ya que daña las escobillas, el conmutador y las bobinas.

Lo que ocurre es que el eje neutro de la máquina (el eje en el cual las escobillas no producen chisporroteo en el conmutador) gira y se aleja más del eje mecánico a medida que crece más la corriente de armadura y estará variando su ángulo de giro con corrientes variables en la armadura.

Precisamente es debido a lo anterior, que en la mayoría de los motores de C.D. actuales, las escobillas no se giran físicamente --- hasta un posible eje neutro para una corriente dada, sino que se -- prefiere usar interpolos.

Los interpolos reducen pero no eliminan completamente el chisporroteo. Son pequeños polos localizados entre los polos principales y -- están devanados con alambre grueso y conectados en serie con el --- circuito de armadura.

El flujo magnético creado por los interpolos tiene dos efectos; el primero es generar un voltaje en los conductores de la armadura que se oponga al voltaje reactivo reduciendo por consiguiente el chisporroteo, y segundo proporcionar flujo magnético para compensar la reacción de armadura.

Cuando la corriente de armadura cambia, también cambia el flujo en los interpolos y por lo tanto se tiene la compensación adecuada --- para cada corriente en particular.

En la figura II-12 se representa un motor de C.D. con sus devanados y conexiones características.

ARRANQUE DE MOTORES DE C.D.--

Anteriormente se señaló que cuando un motor de C.D. se arranca, la corriente de armadura inicial es muy grande y debe ser limitada por medio de un arrancador externo para prevenir un daño a la máquina. La forma más simple de arrancador es una resistencia que pueda ser fácilmente conectada y desconectada del circuito en pasos. Este tipo de arrancador puede ser operado manualmente ó magnéticamente.

En los controles electrónicos de C.D. hay una limitación de co---- rriente inherente al control por lo que no se usa arrancador.

INVERSION DEL SENTIDO DE GIRO.--

Hay tres maneras para invertir el sentido de giro de un motor de -- C.D. La primera es invirtiendo la dirección de la corriente a ----- través del campo devanado, la segunda es invirtiendo el voltaje de

armadura y la tercera es invirtiendo el campo del generador en un sistema Eard Leonard.

En la figura II-13 se muestra un arreglo de contactores usados en el circuito de armadura de un motor de C.D. para invertir su giro. Un arreglo similar de contactores puede usarse también para el circuito de campo. Para invertir permanentemente el sentido de giro del motor, se invierten las terminales del campo devanado. Cuando se invierte el sentido de giro de un motor compuesto ó estabilizado se debe asegurar de invertir solamente los devanados paralelo y serie, y no la armadura y viceversa.

Cuando se usa un control electrónico de los llamados espalda con espalda solamente se necesita que cambie de polaridad el voltaje de referencia sin necesidad de operación de contactores.

CAPACIDAD DE MOTORIZACION-REGENERACION.-

El motor de C.D. puede girar en ambos sentidos, al recibir potencia eléctrica y transmitirla a la carga en forma de par mecánico tiene lugar el proceso de motorización.

Por el contrario cuando el motor recibe un par mecánico de la carga y lo transmite a la fuente de alimentación eléctrica en forma de corriente, se le llama regeneración. graficamente todas estas características pueden resumirse en los diagramas de cuatro cuadrantes mostrados en la figura II-14.

Para operar en todos los cuadrantes sin utilizar contactores, es necesario usar dos puentes rectificadores trifásicos conectados entre sí, de tal manera que sostengan un flujo de corriente en direcciones opuestas. Con esta configuración se deben tomar precauciones adicionales en el circuito para asegurar que un solo puente rectificador esté conduciendo, ya que si los thyristores de ambos puentes estuvieran conduciendo al mismo tiempo provocarían una falla o corto circuito de línea a línea.

En esta configuración de puentes rectificadores conectados espalda con espalda, se tienen las características de respuesta rápida ----

AL CONTROL DE CORRIENTE DIRECTA

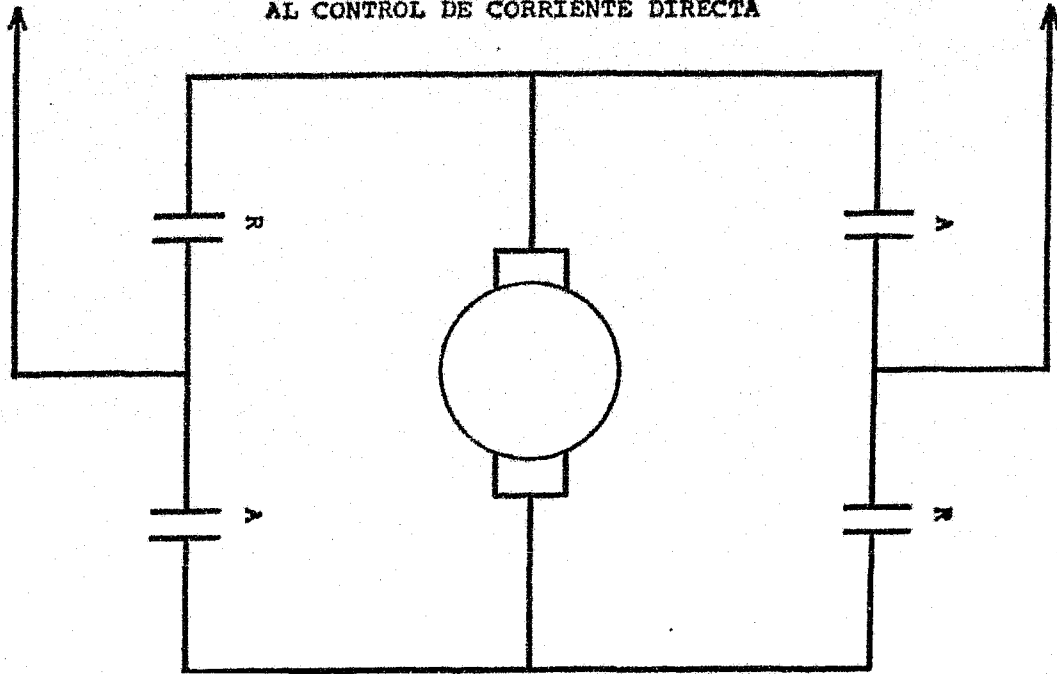
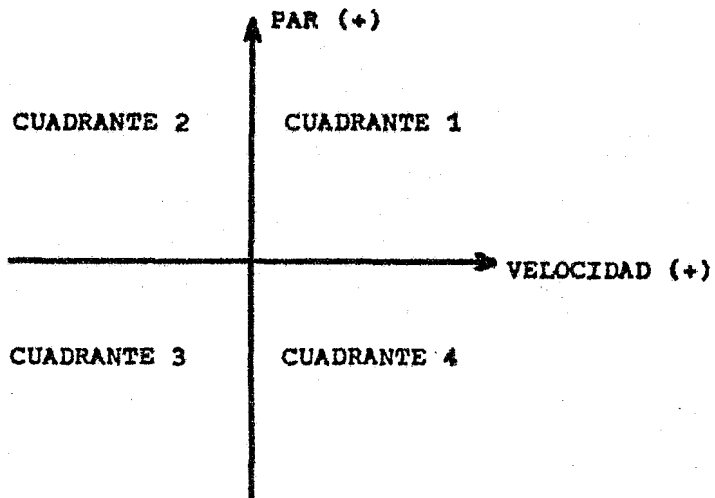
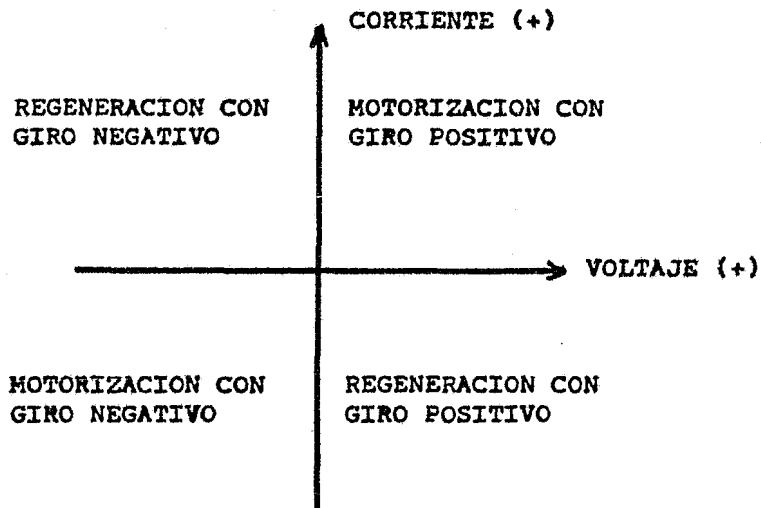


FIGURA II - 13



TRANSFERENCIA DE POTENCIA MECANICA



TRANSFERENCIA DE POTENCIA ELECTRICA

FIGURA II - 14

asociados con el sistema que unicamente cuenta con motorización y tiene muy poco retraso en el proceso en que un puente rectificador se apaga y el otro se enciende durante un flujo de potencia inverso dentro del sistema controlador. El sistema espalda con espalda es de un precio mayor que el sistema normal, debido al uso de dos puentes rectificadores, pero si la aplicación lo permite se puede elegir un puente de capacidad menor para la regeneración. En la figura II-15 vemos un diagrama simple de rectificadores espalda con espalda.

Otro arreglo con módulos o puentes regenerativos se logra al invertir la polaridad del campo del motor para conseguir total capacidad regenerativa. Los sistemas de controles de C.D. actuales pueden producir motorización y regeneración con un solo puente de thyristores en la armadura mediante la inversión del campo del motor cuando se requiere una inversión del par del motor. Este tipo de sistema tiene la ventaja económica de usar un solo puente para la armadura, pero la respuesta del control es limitada por la constante de tiempo eléctrica (L / R) del campo del motor. En la figura II-16 mostramos este arreglo.

CONTROL DE LA VELOCIDAD DE MOTORES DE C.D.-

De la ecuación general de un motor de C.D. podemos despejar la velocidad N

$$V_t = K\phi N + I_a R_a$$

$$N = \frac{V_t - I_a R_a}{K\phi}$$

De la ecuación anterior podemos observar que hay dos maneras de controlar la velocidad del motor de C.D., la primera es controlando el voltaje terminal aplicado en la armadura V_t , y la segunda es controlando el flujo magnético ϕ , lo que es lo mismo el voltaje -

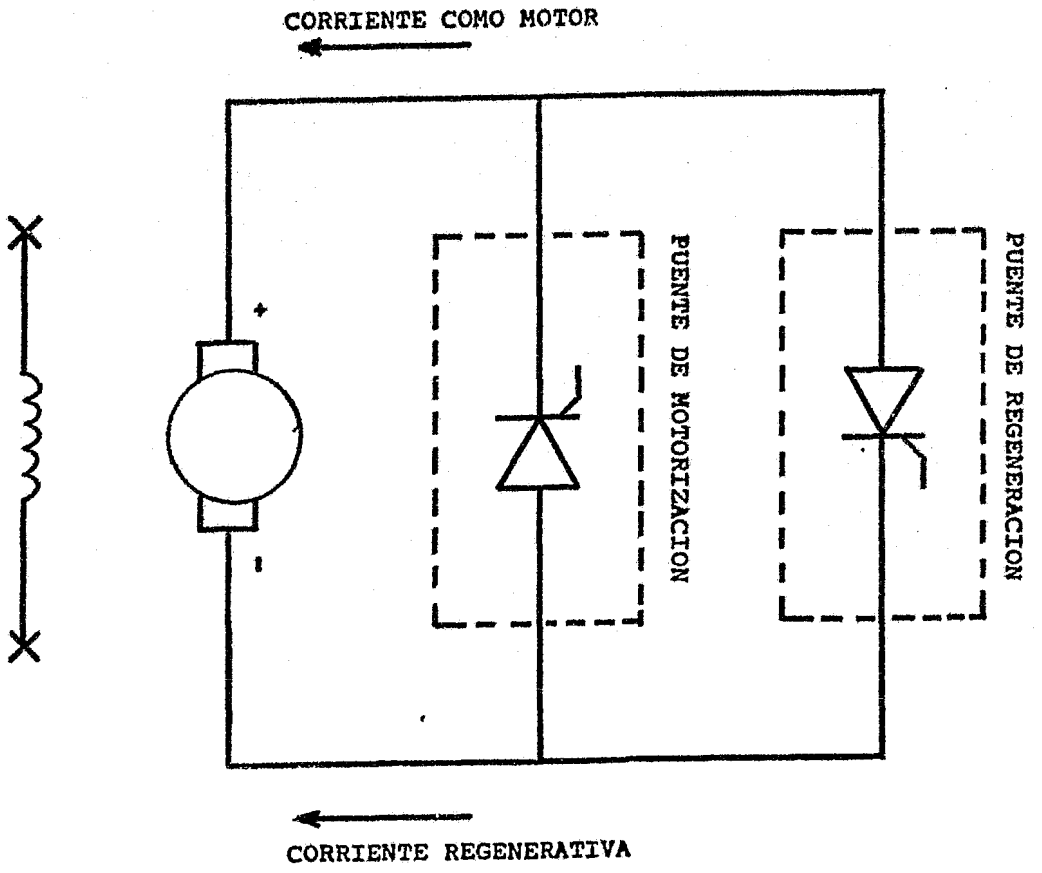


FIGURA II - 15

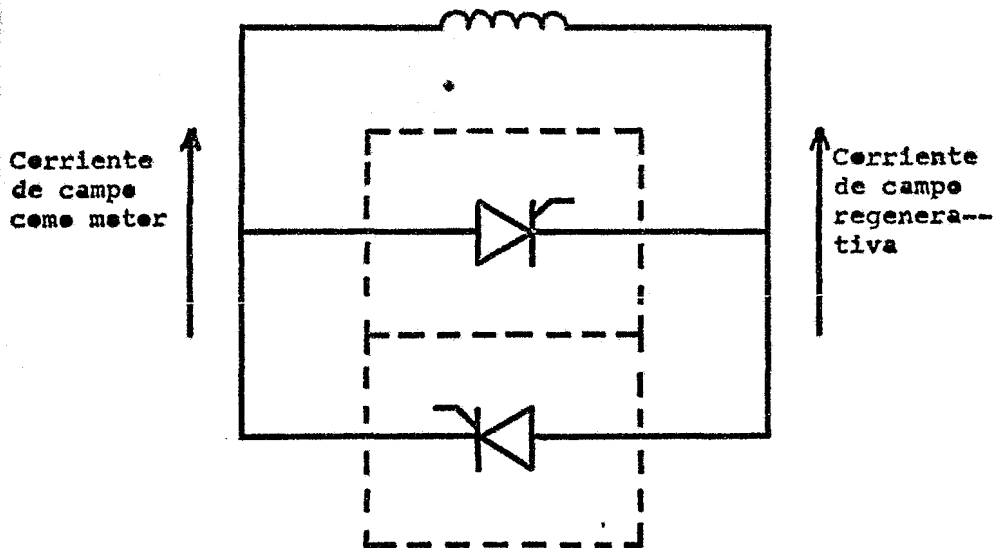
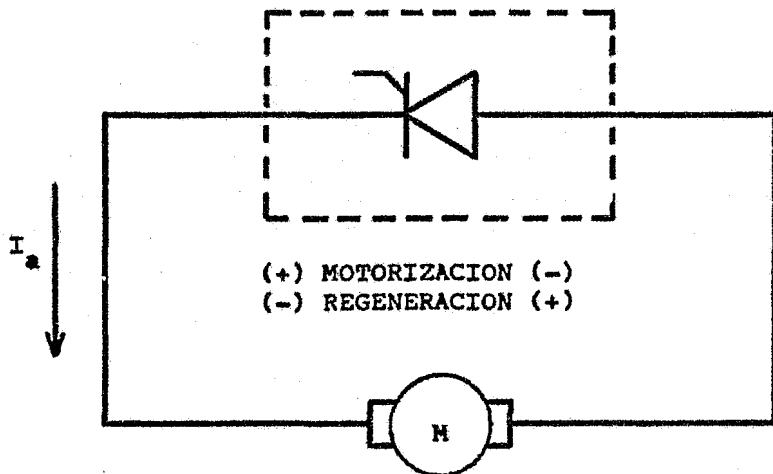


FIGURA II - 16

aplicado al campo que nos produce dicho flujo.

La velocidad base de un motor de C.D. es la que se obtiene cuando se aplica el voltaje nominal, tanto en la armadura como en el campo. Variando el voltaje de armadura se controla el motor a velocidades menores que la velocidad base, y este tipo de control se realiza solo cuando hay pleno voltaje de campo aplicado, y se le conoce como el rango de "voltaje" del control de velocidad.

Variando el voltaje del campo se controla al motor a velocidades mayores que la velocidad base, se hace solamente con un voltaje de armadura totalmente aplicado, y se le conoce como el rango de "campo debilitado" del control de velocidad.

Cuando el campo se alimenta de una fuente de potencial constante, se puede controlar el voltaje aplicado colocando un reóstato de cierta resistencia y potencia, en serie con el devanado, aumentando su resistencia se reduce la corriente del campo y por lo tanto la magnitud del flujo, lo que ocasiona un aumento en la velocidad del motor. Este método solo se usa cuando se necesita controlar la velocidad en el rango de campo debilitado y cuando se necesita hacer ajustes ocasionales.

Cuando se necesita un ajuste continuo y/o preciso a valores predefinidos de velocidad, se reemplaza el reóstato por una fuente controlada de voltaje variable, tal como un control electrónico.

SISTEMA WARD LEONARD.-

Este sistema emplea el principio de control de velocidad en el rango de "voltaje" e en combinación con el rango de campo debilitado.

En la figura II-17 se muestra este arreglo.

El funcionamiento es como sigue; el motor de corriente alterna maneja al generador de corriente directa y al excitador de control a una velocidad constante. El excitador de control es un pequeño generador de C.D. autoexcitado que proporciona una salida de potencial constante, con el reóstato del campo del motor en cero resistencia; se controla el reóstato del campo del generador, lo que a su vez controla el voltaje de armadura generado y por consiguiente la

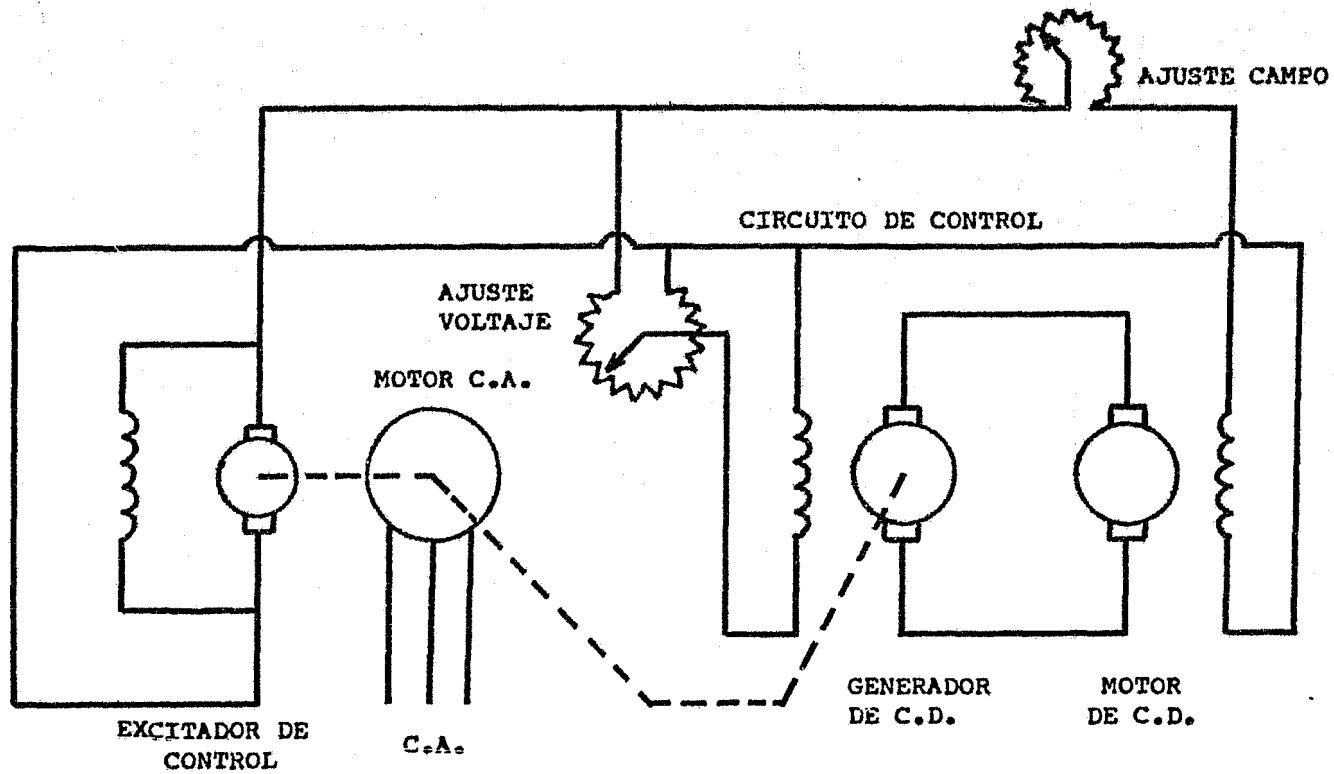


FIGURA II - 17

velocidad del motor de C.D. en un rango menor a la velocidad base, cuando se aplica todo el voltaje al campo del generador se llega a la velocidad base del motor y es entonces cuando se puede controlar la velocidad del motor, con el restato del campo del motor, para trabajar a velocidades superiores a la velocidad base.

El sistema Ward Leonard se puede modificar reemplazando el excitador de control y los restatos, por paneles electrónicos. La modificación mayor es cuando se reemplaza completamente el generador por un control electrónico del tipo estático con thyristores, sin embargo el principio es el mismo.

La ventaja de los controles estáticos de C.D., es que se pueden usar técnicas de retroalimentación muy precisas para obtener velocidades del motor igualmente precisas.

CURVAS DE PAR Y POTENCIA.-

En la figura II-18 vemos las curvas de par y potencia contra velocidad, cuando la corriente de armadura es constante para un motor de C.D.

Como vimos anteriormente, el flujo del campo es constante cuando el motor trabaja en el rango de "voltaje", y la corriente de armadura también debe ser constante para una carga dada, por lo tanto el par del motor también será constante.

$$T = K\phi I_a \quad \text{dónde } \phi = \text{constante, } I_a = \text{constante}$$

sin embargo en este rango la potencia es variable ya que el voltaje aplicado es variable, como vemos enseguida:

$$P = VI_a \quad \text{dónde } I_a = \text{constante}$$

Es debido a lo anterior que al rango de "voltaje" se le conoce también como rango de "par constante".

En el rango de campo debilitado el voltaje y la corriente de armadu

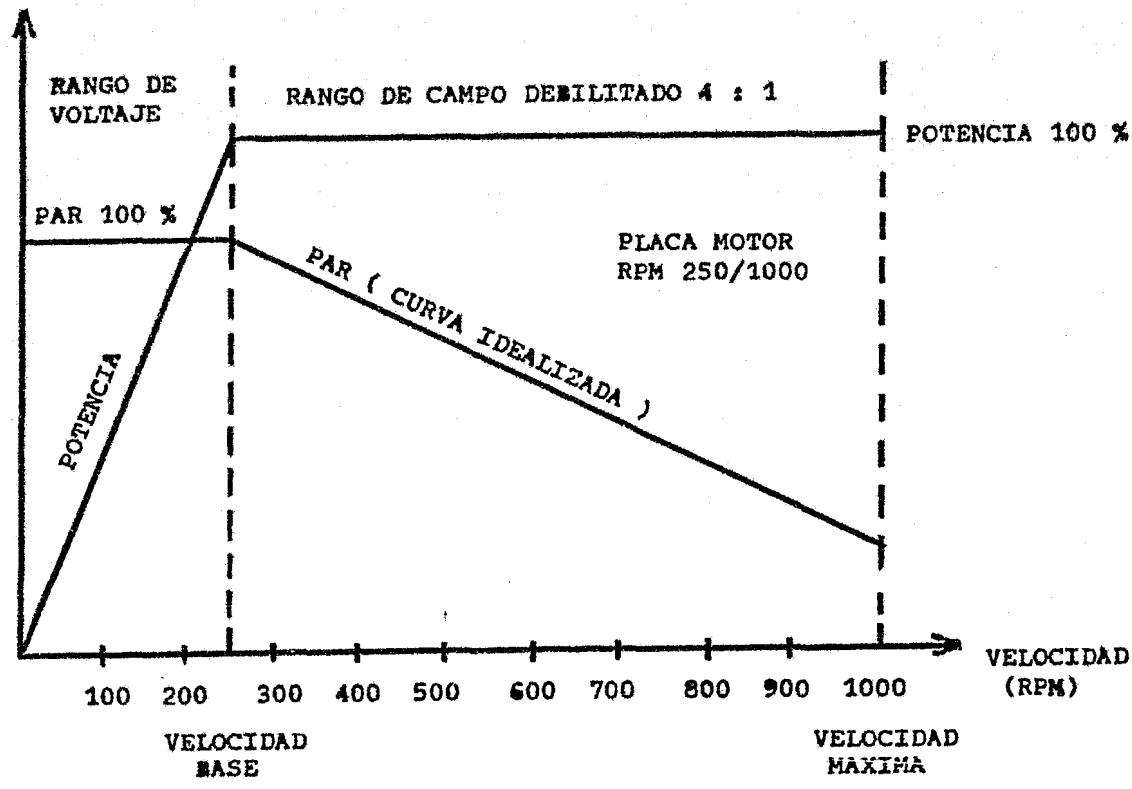


FIGURA II - 18

ra permanecen constantes y por consiguiente también la potencia, -- sin embargo como el flujo se reduce, también se reduce el par del motor. Es por esto que al rango de campo debilitado también se le conoce como rango de potencia constante.

Si el motor tiene como datos de placa en cuanto a velocidad ----- 250/1000 RPM, quiere decir que el motor puede ser operado con seguridad hasta cuatro veces la velocidad base, que en este caso son -- 250 RPM.

Podemos observar sin embargo, que cuando se debilita el campo hasta obtener la velocidad máxima (1000RPM), reducimos el par disponible del motor en la misma proporción (hasta un cuarto del par nominal a velocidad base), esto significa que si el par de la carga es constante, la corriente de armadura será cuatro veces la corriente nominal a velocidad base, es por esto que este rango solo se aplica con cargas cuyo par va decreciendo.

Las curvas mostradas solo son correctas, cuando la corriente de armadura se mantiene constante.

FRENADO REGENERATIVO Y DINAMICO.-

El frenado regenerativo lo vimos anteriormente, y es esencialmente que el motor al suspenderle la alimentación de armadura, sigue girando por efecto de la inercia de su carga, y como aún tiene conectado el circuito de campo, actúa como generador de C.D. regresando corriente a la línea de alimentación, que en este caso representa -- una carga y frena rápidamente al conjunto motor-carga.

Cuando se desconecta la alimentación al motor subitamente y se conecta una resistencia en las terminales de armadura del motor que -- actúa ahora como generador, la resistencia presentará una carga que frenará rápidamente al motor, a este proceso se le llama frenado -- dinámico.

El frenado dinámico proporciona un paro más rápido del motor que el frenado regenerativo, pero su desventaja es que no puede ser controlado el grado de freno. El valor de la resistencia se determina

de acuerdo con el tiempo de paro deseado, pero sin sobrepasar la --
corriente nominal de armadura del motor.

CAPITULO III : PRINCIPIOS DE ELECTRONICA UTILIZADOS

INTRODUCCION A LOS SEMICONDUCTORES.-

Los dispositivos semiconductores están hechos de dos elementos, -- que son el silicio y el germanio. Para nuestro estudio usaremos el silicio como material básico, debido a su mayor aplicación práctica y a sus muchas ventajas sobre el germanio.

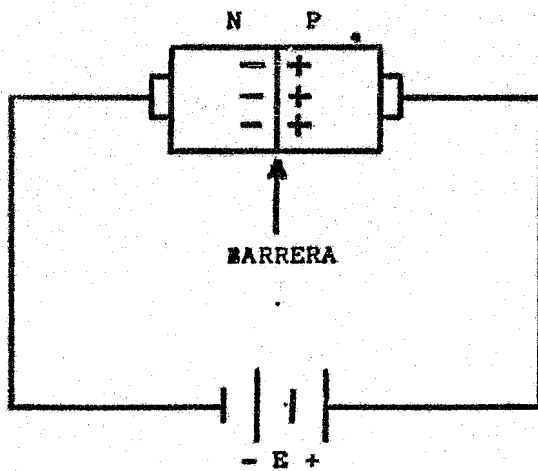
El silicio puro es un pobre conductor, tiene cuatro electrones en sus órbitas externas, los que están fuertemente ligados en su lugar por su núcleo asociado y por lo tanto no son electrones libres. Material tipo N.- Agregando impurezas al silicio, que suministren electrones extras creamos un material tipo N. A este proceso se le llama dopado (o doping en inglés) del cristal de silicio.

Esas impurezas contienen cinco electrones en su órbita externa y ocasionan un exceso de electrones en el cristal, la cantidad en -- que se adicionan, es del orden de una parte de impurezas por cada diez millones de partes de silicio. Los átomos de impurezas toman posiciones en una densidad relativamente uniforme en el cristal. Los elementos usados como impurezas son; el arsénico, el fósforo, y el antimonio.

Material tipo P.- Este material se obtiene adicionando impurezas -- al silicio que solo tengan tres electrones en su órbita externa, -- creando una escasez de electrones (donde falta un electrón se le llama hueco) en el cristal, o de otra manera, un exceso de huecos. Los materiales usados son; galio, indio, boro y aluminio.

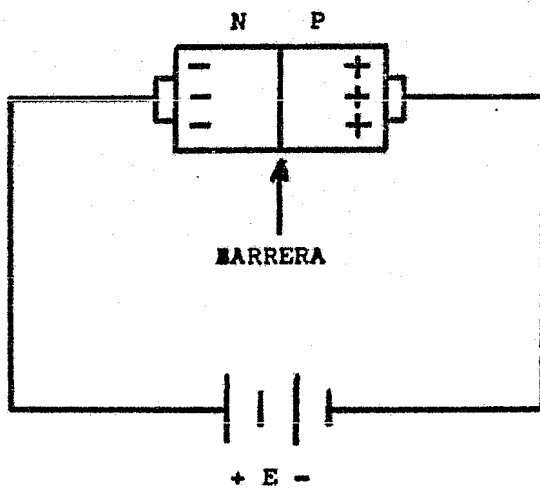
Juntura P-N.- si unimos los dos materiales P y N ya vistos, obtendremos interesantes resultados. Si utilizamos una batería o fuente de corriente directa y la aplicamos según las figuras III-1 y ---- III-2 sucederá lo siguiente:

En la figura III-1 los electrones de la región N serán repelidos -- hacia la barrera de la juntura. Esta barrera existe físicamente y representa una resistencia que requiere 0.5 volts aproximadamente para que sea vencida, por lo que si la batería E es mayor de 0.5 --



POLARIZACION DIRECTA

FIGURA III - 1



POLARIZACION INVERSA

FIGURA III - 2

volts, los electrones serán forzados a través de la barrera y se combinarán con huecos en la región P, de ahí serán atraídos por la terminal positiva de la batería, creándose un flujo de electrones a través de la unión P-N.

En la figura III-2, la batería se polariza inversamente. Los electrones de la región N son atraídos hasta el extremo opuesto de la barrera, lo mismo que los huecos en la región P, lo que ocasiona que la resistencia de la unión se eleve grandemente puesto que huecos y electrones no se pueden combinar tan fácilmente y se puede decir que hay un flujo de electrones nulo o casi nulo en esta configuración.

A la juntura P-N, que como vimos deja pasar corriente en una sola dirección se le conoce como diodo. El diodo presenta una alta resistencia en la polarización inversa y una muy baja en la polarización directa. El símbolo del diodo lo vemos en la figura III-3 y en la figura III-4 tenemos la curva característica de un diodo.

THYRISTORES.-

También llamadas SCR'S (silicon controlled rectifiers) son relativamente recientes, convirtiéndose en el equivalente del thyatron. Los thyristores se usan en rectificadores controlados de corriente alterna a corriente directa, al decir controlados nos referimos a que podemos controlar el momento en que el thyristor puede empezar a conducir como diodo, durante el medio ciclo de corriente alterna en que el thyristor está polarizado directamente con dicha corriente alterna, e impidiendo el paso de la corriente en el medio ciclo en que el thyristor está polarizado inversamente.

Mediante la figura III-5 podemos ver mejor su funcionamiento.

Como vimos para junturas P-N, éstas deben estar polarizadas directamente para que conduzcan, y por lo tanto para que el thyristor conduzca, las junturas A, B, y C mostradas en la figura deben estar polarizadas directamente.

Este se logra solo cuando la polarización de la compuerta es posi-

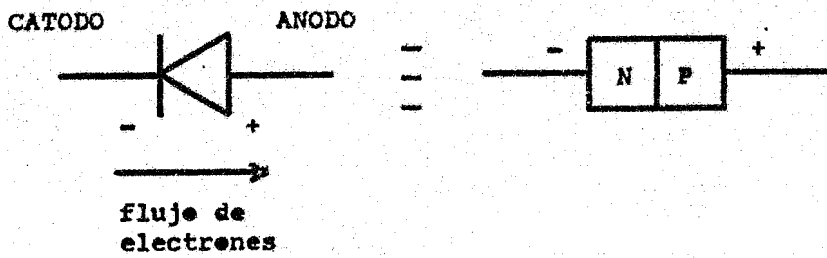


FIGURA III - 3

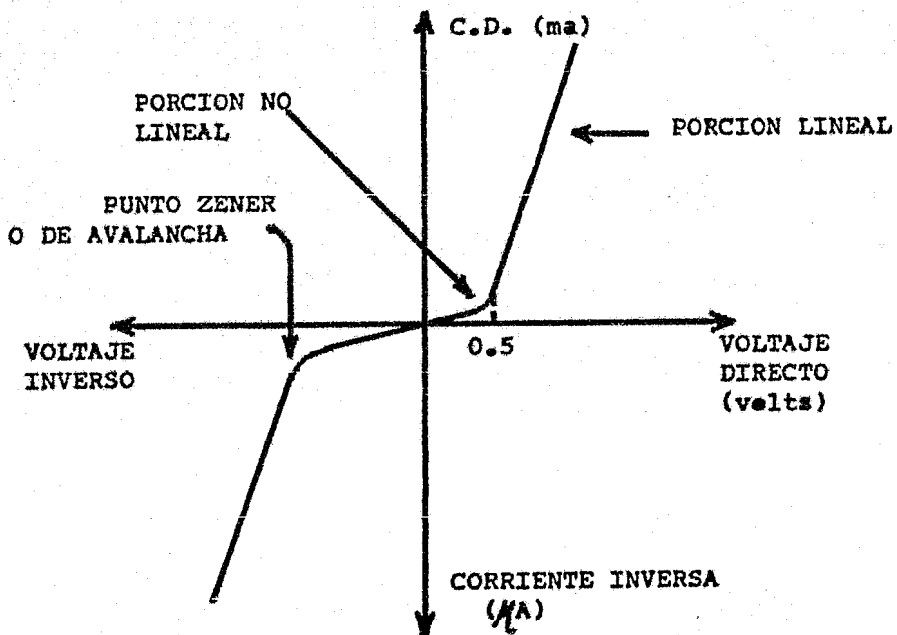
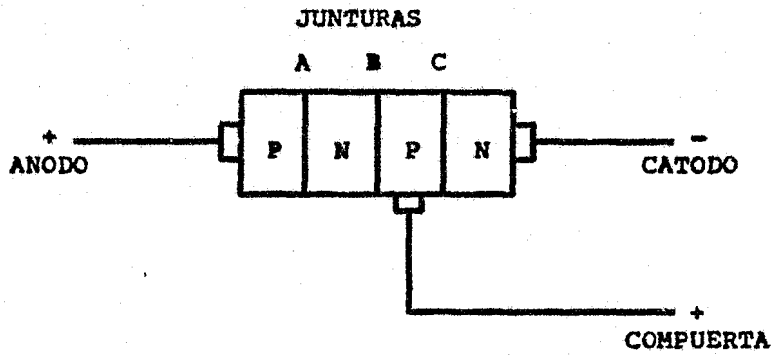


FIGURA III - 4



SIMBOLO DEL TNYRISTOR

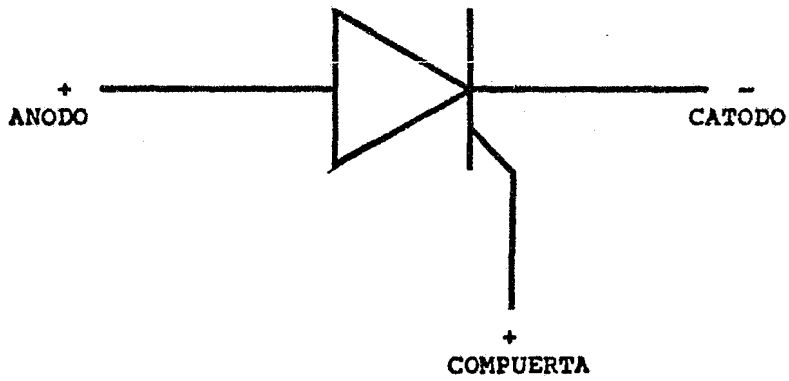


FIGURA III - 5

tiva; la del ánodo positiva y la del cátodo negativa, momento en que el thyristor se encenderá. Para encender al thyristor basta con un solo pulso positivo en la compuerta, cuando está polarizado directamente el thyristor.

La figura III-6 nos muestra el resultado de aplicar a la compuerta un voltaje positivo con diferentes ángulos de disparo, y en la figura III-7 se muestra el circuito de prueba.

Puesto que los rectificadores son dispositivos cuyo valor de salida se obtiene con el valor RMS de la forma de onda, puede verse de las figuras anteriores que conforme el pulso de compuerta tarda más en aparecer (incremento del ángulo de cebado), el valor RMS de la corriente de salida decrece. Por consiguiente con un ángulo de cebado ó encendido de cero grados la salida es máxima, con un ángulo de noventa grados la salida es la mitad, y así por el estilo. La salida es cero cuando el ángulo de encendido es de ciento ochenta grados.

Como en el thyratrón, el thyristor conducirá después del encendido hasta que la corriente alterna cambie de polaridad.

Corriente de mantenimiento.-

Cuando la carga de la corriente rectificadora es inductiva, se presenta el problema de que la corriente comenzará a fluir a partir del momento de encendido, pero alcanzará un máximo noventa grados después. Sin embargo se debe alcanzar un nivel mínimo de corriente en la carga antes de que el pulso de encendido decaiga, o de lo contrario el thyristor se apagará o bloqueará. Este efecto es debido al retraso inherente de la corriente causado por la inductancia de carga.

Para solucionar este problema se coloca una resistencia en paralelo con la carga inductiva, que nos haga alcanzar esa mínima corriente (que es una pequeña fracción de la corriente de carga), la cual está en fase con el voltaje aplicado lo que evitará el retraso debido a la carga inductiva y asegurará que el thyristor no se apague.

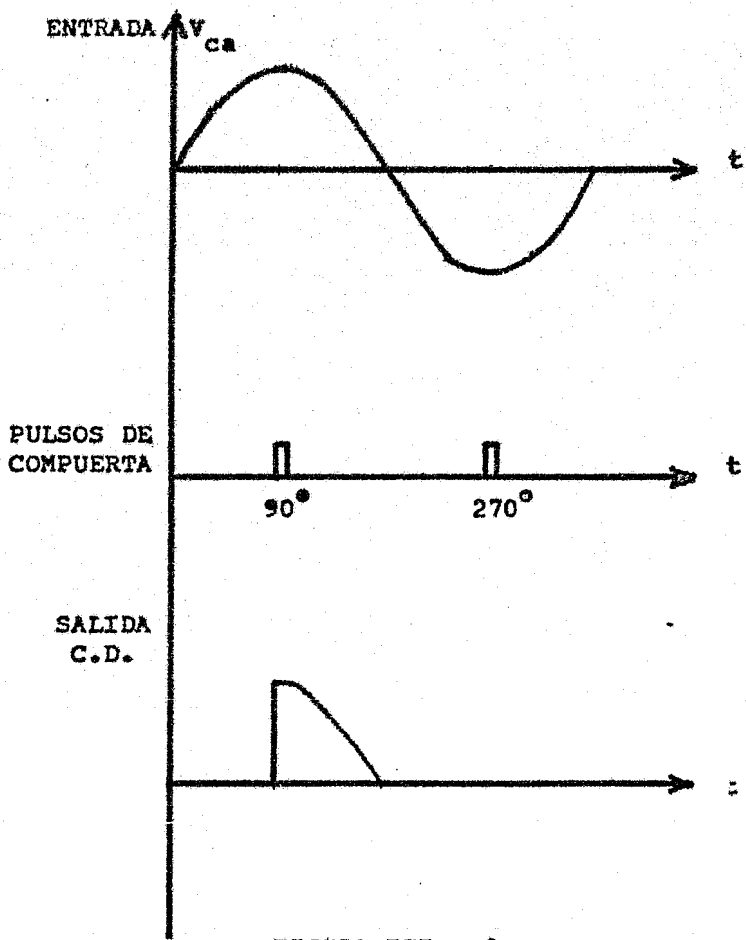


FIGURA III - 6

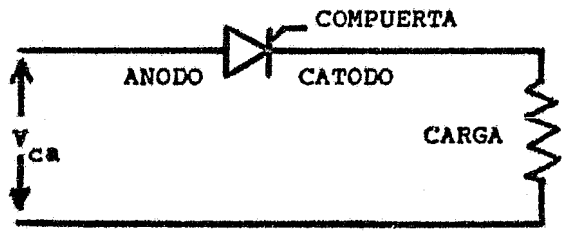


FIGURA III - 7

Se puede hacer una comprobación práctica del estado de los thyristores con un ohmetro de la siguiente manera:

- 1.- mida con un ohmetro entre ánodo y cátodo, debe medirse 1 megohm o más
- 2.- invierta las puntas del ohmetro, debe medirse 1 megohm o más
- 3.- conecte la punta positiva del ohmetro al ánodo y la negativa al cátodo, puentear el ánodo a la compuerta, debe medir menos de 1,000 ohms

La prueba mencionada arriba no es definitiva, pero nos da una idea aproximada del estado del thyristor.

TRANSISTORES.-

El nombre del transistor (también llamado triodo) es una contracción de transfer y resistor.

En el transistor la señal se alimenta en una juntura P-N polarizada directamente que presenta una resistencia baja y la salida se toma de una juntura P-N que presenta una resistencia alta.

Puesto que la potencia es igual a $P = RI^2$, para una corriente dada la potencia desarrollada en una resistencia alta es mayor que la potencia desarrollada en una resistencia baja. Es debido a ello que se tiene una ganancia de potencia en el transistor. (potencia de la señal alimentada más no de la polarización).

Los dos tipos básicos de transistores y sus símbolos se muestran en la figura III-8.

Al primer transistor de la figura se le conoce como transistor NPN y consiste de un cristal tipo P en medio de dos cristales tipo N, en la segunda figura tenemos un transistor PNP que consiste de un cristal tipo N entre dos cristales tipo P.

La polarización del transistor es muy importante y de ello depende la correcta operación de un circuito. Existen cuatro clases de

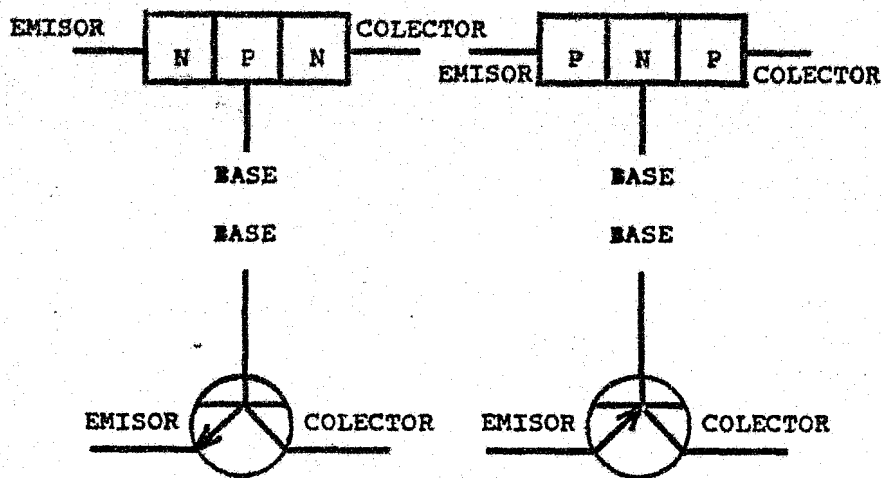


FIGURA III - 8

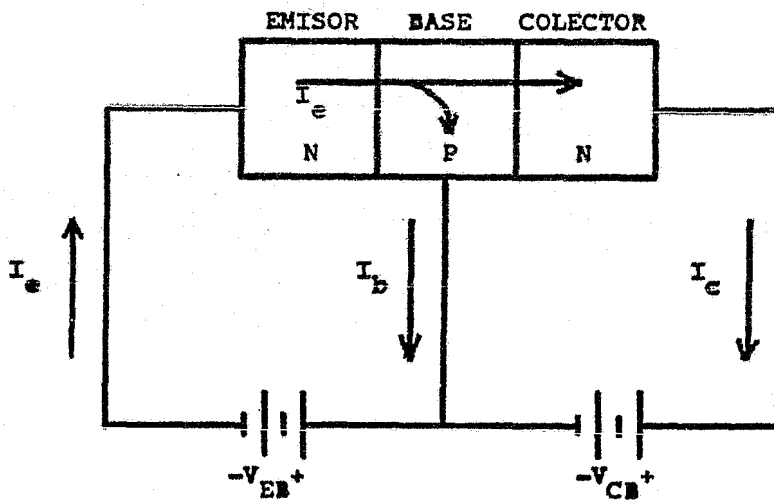


FIGURA III - 9

peración para transistores y bulbos; clase A, clase AB, clase B, y clase C.

La clase de operación del circuito depende de la función que desarrollará dicho circuito, por ahora consideraremos solo la clase A. En la figura III-9 tenemos la polarización correcta de un transistor NPN.

Debido al potencial de V_{EB} , los electrones se mueven y cruzan la juntura E-B hacia la región de la base, pero debido a que esta región es muy ancha y debido también al potencial positivo del colector que es mucho mayor que el de la base, la mayor parte de la corriente (de un 92 % a un 99 %) de electrones entra al colector, de donde la batería V_{CB} los extrae ó colecta.

El resto de electrones forma la corriente de base I_B que es extraída por la terminal positiva de la batería V_{EB} .

Al porcentaje de la corriente I_E que pasa al colector (92 al 99 %) para formar la corriente I_C se le conoce como la ganancia de corriente y se le representa con la letra α , también se le designa h_{fb} y generalmente los fabricantes le dan como una cantidad decimal, ejemplo 0.963.

Hay algunas reglas aplicables a los transistores que conviene tener presente:

- 1.- la primera letra del tipo de transistor (NPN ó PNP) -- indica la polaridad de voltaje emisor.
- 2.- la segunda letra (NPN ó PNP) nos indica la polaridad del voltaje colector.
- 3.- la dirección de los electrones (en C.D.) es siempre -- contraria a la flecha que indica el emisor, sin importar el tipo de transistor.
- 4.- Si los electrones fluyen hacia dentro del emisor, la mayoría saldrá por el colector.
- 5.- la juntura base-emisor siempre deberá estar polarizada directamente.

6.- la juntura colector-base siempre deberá estar polarizada inversamente, si se polariza directamente el transistor puede destruirse.

Las tres configuraciones básicas de amplificadores con transistores son; emisor común, colector común y base común. La configuración de emisor la veremos después.

La configuración de colector común se caracteriza por una ganancia de voltaje menor de uno, alta impedancia de entrada, baja impedancia de salida, alta ganancia de potencia y cero grados de defasamiento entre entrada y salida. Su uso más frecuente es como un dispositivo acoplador de impedancias y como un amplificador de corriente o de potencia.

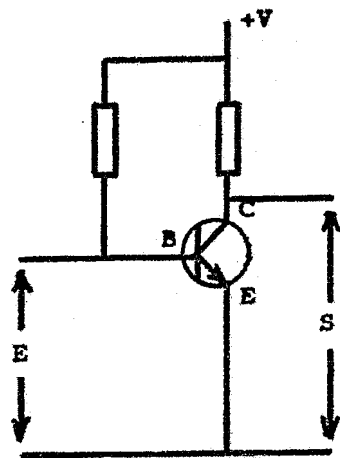
La configuración base común se caracteriza por tener relativamente baja impedancia de entrada, alta impedancia de salida, ganancia regular de voltaje y potencia y cero grados de defasamiento. Se usa frecuentemente para acoplar dispositivos de baja impedancia de salida con dispositivos de alta impedancia de entrada, así como en amplificadores de radio frecuencia. Ver figura III-10.

POLARIZACION DE TRANSISTORES.-

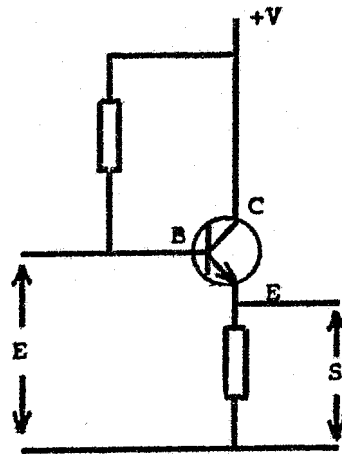
El símbolo h_{fb} denota la relación de transferencia directa, h (híbrido), f (forward current), b (common base). De la misma manera h_{fe} es la relación de transferencia directa en una configuración con emisor común y h_{fc} en un amplificador del tipo colector común.

La corriente I_{cbe} es la corriente de colector a base, con el emisor abierto y se le conoce con muchos nombres como; corriente de saturación, corriente inversa del colector, corriente de fuga, etc.

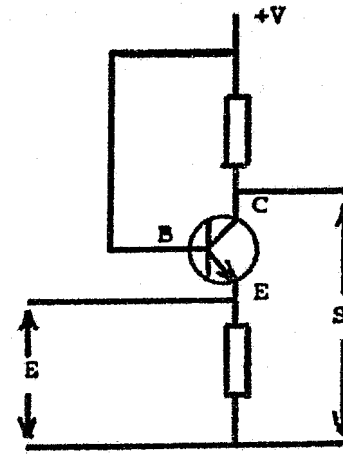
Como vimos anteriormente la corriente del emisor I_e se divide en dos partes; la corriente de colector I_c y la de base I_b ó :



EMISOR COMUN



COLECTOR COMUN



BASE COMUN



E = ENTRADA , S = SALIDA

FIGURA III - 10

$$\alpha = \frac{I_c}{I_e} = \frac{I_c}{I_c + I_b} \quad \text{y} \quad \beta = \frac{I_c}{I_b} ; \quad I_b = \frac{I_c}{\beta}$$

sustituyendo el valor de I_b en la fórmula encontrada para α :

$$\alpha = \frac{I_c}{I_c + I_c / \beta} \quad \text{dividiendo entre } I_c \text{ tendremos:}$$

$$\alpha = \frac{I_c / I_c}{I_c / I_c + I_c / \beta / I_c} = \frac{1}{1 + 1 / \beta}$$

multiplicando ahora por β :

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + \beta / \beta} = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

$$\underline{\underline{\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}}}$$

de la misma manera podemos encontrar que:

$$(1 + \beta)\alpha = \beta ; \quad \alpha + \alpha\beta - \beta = 0$$

$$\alpha - \beta(1 - \alpha) = 0 ; \quad -\beta(1 - \alpha) = -\alpha$$

$$\beta(1 - \alpha) = \alpha$$

$$\underline{\underline{\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}}}$$

Estas relaciones entre α y β son muy útiles para analizar circuitos de transistores y muy necesarias para una completa comprensión de ellos.

El valor de α siempre es menor que uno y el valor de β siempre es mayor que uno.

$$I_e = I_c + I_b$$

El porcentaje de I_e que se convierte en I_c es; $I_c = \alpha I_e$, a la letra α se le conoce como h_{fb} y es del orden de 0.92 a 0.99.

Por consiguiente podemos deducir el valor de la corriente de base idealmente sin considerar la corriente de fuga I_{cbe} .

$$I_c = h_{fb} I_e \quad \text{y} \quad I_c = I_e - I_b$$

igualando las dos ecuaciones anteriores tenemos:

$$h_{fb} I_e = I_e - I_b \quad ; \quad I_b = I_e - h_{fb} I_e = I_e (1 - h_{fb})$$

$$\underline{I_b = I_e (1 - h_{fb})}$$

Pero en la realidad existe I_{cbe} que es de sentido opuesto a I_b -- por lo que finalmente queda:

$$\underline{I_b = I_e (1 - h_{fb}) - I_{cbe}}$$

si la corriente I_b es positiva quiere decir que fluye hacia afuera de la base y si es negativa fluye hacia la base.

Definiendo los siguientes factores:

$$\alpha = \frac{\Delta I_c}{I_e} = \frac{\text{cambio en la corriente del colector}}{\text{cambio en la corriente del emisor}}$$

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{I_b} = \frac{\text{cambio en la corriente del colector}}{\text{cambio en la corriente de base}}$$

podemos obtener la relación entre ambos parámetros como sigue:

El tipo de amplificador más usado es el de la configuración ----- emisor común que podemos ver en la figura III-11 .

La señal de entrada se aplica entre los puntos 1 y 2, y la salida se toma de entre los puntos 3 y 4 .

Dando los siguientes valores:

$$R_1 = 6 \text{ K}\Omega, R_2 = 19.6 \text{ K}\Omega, R_L = 1.5 \text{ K}\Omega, R_e = 1 \text{ K}\Omega, \text{ y } V_{cc} = 10 \text{ volts}$$

podemos encontrar los voltajes y polaridades en todo el circuito.

El circuito de la figura III-12 es un equivalente del circuito de entrada del amplificador básico mostrado en la figura III-11.

Podemos ver que:

$$V_{bb} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) V_{cc} \text{ y } R_b = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

con los datos conocidos tenemos:

$$V_{bb} = \left(\frac{6\text{K}}{6\text{K} + 19.6\text{K}} \right) (10) = 2.34 \text{ volts}$$

$$R_b = \frac{6(19.6)}{6 + 19.6} = 4.59 \text{ K}\Omega$$

necesitamos dos ecuaciones para describir la operación del circuito del transistor. La primera es:

$$V_{cc} = V_{ce} + I_c R_L + I_e R_e$$

$$\text{pero como } I_c = \alpha I_e \text{ y } I_e = I_c / \alpha$$

$$V_{cc} = V_{ce} + I_c (R_L + R_e / \alpha) \text{ y finalmente}$$

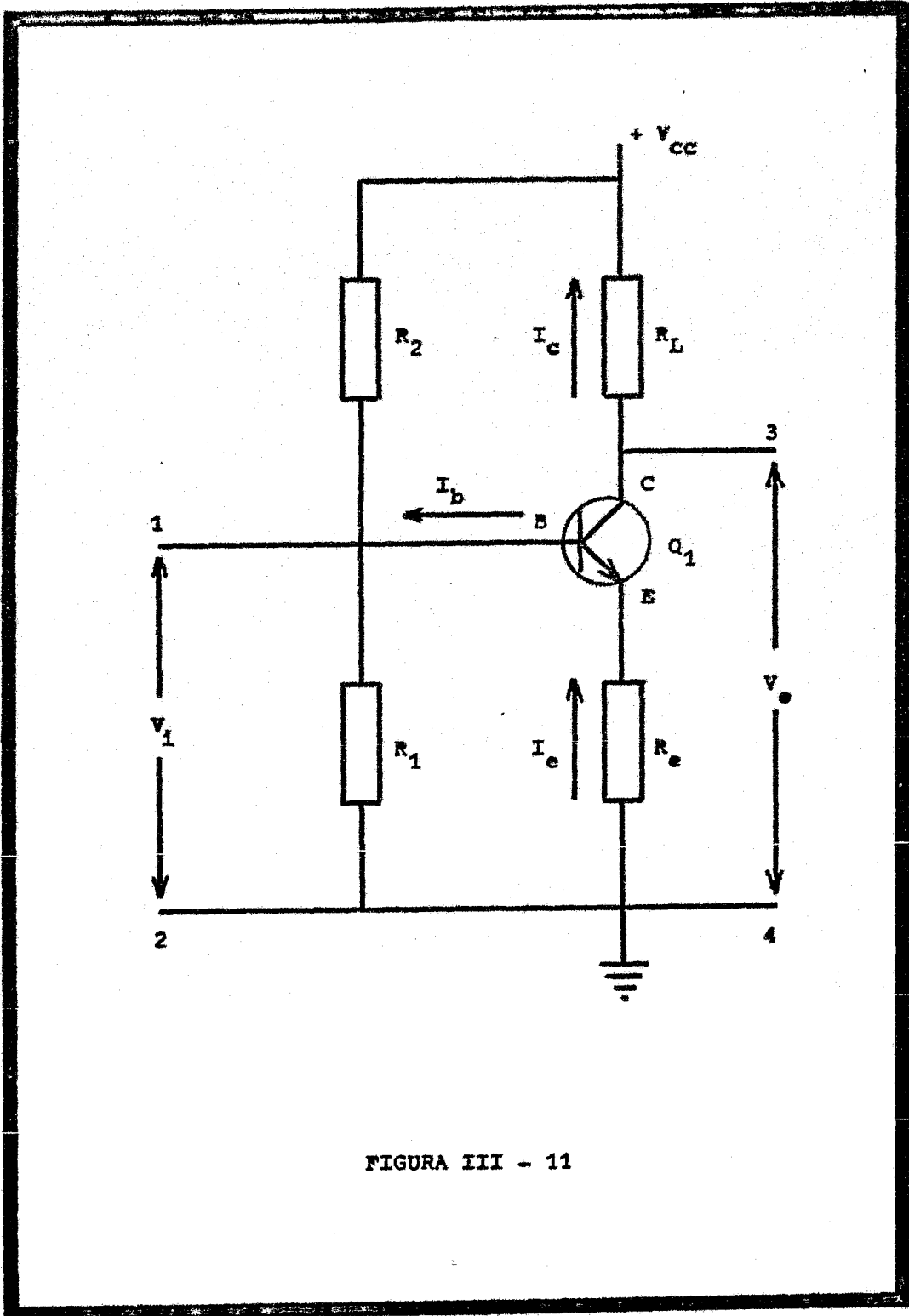


FIGURA III - 11

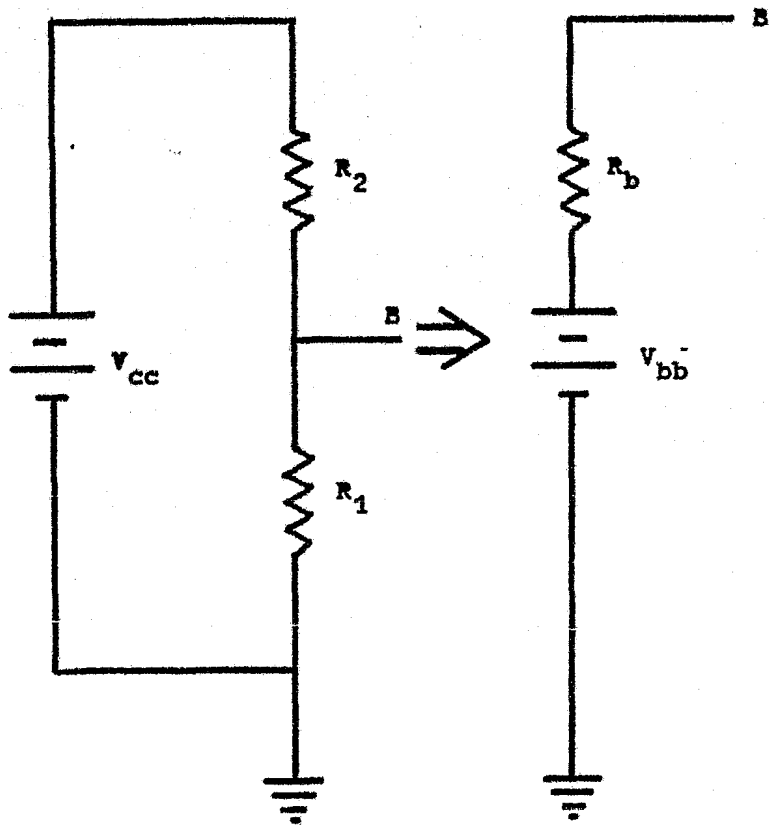


FIGURA III - 12

$$I_c = \frac{V_{cc} - V_{ce}}{R_L + R_e / \alpha} \text{-----(a)}$$

La segunda ecuación es :

$$V_{bb} = V_{be} + I_e R_e + I_b R_b \text{ y como}$$

$$I_c = \alpha I_e \quad \text{y} \quad I_c = \beta I_b$$

igualando tenemos $\alpha I_e = \beta I_b$ y por lo tanto

$$I_b = \frac{\alpha}{\beta} I_e \text{ y como } \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \text{ sustituimos y}$$

$$I_b = \frac{(\alpha)}{\frac{\alpha}{1-\alpha}} I_e = (1-\alpha) I_e$$

$$V_{bb} = V_{be} + I_e R_e + (1-\alpha) I_e R_b$$

$$V_{bb} = V_{be} + I_e (R_e + (1-\alpha) R_b) \text{-----(b)}$$

Para trazar la recta de polarización, obtenemos la corriente de --
 detector de operación I_{cq}

$$I_{cq} = \frac{V_{cc} / 2}{R_L + R_e} = \frac{10 / 2}{1.5 + 1} = 2 \text{ miliamperes}$$

y para obtener los extremos de la recta; cuando $I_c = 0$, $V_{ce} = 10 -$
 (extremo inferior) y si $V_{ce} = 0$ entonces

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_L + R_e} = \frac{10}{1.5 + 1} = 4 \text{ miliamperes que es el otro extremo de la recta.}$$

De las curvas típicas de este tipo de transistor vemos que para las condiciones de operación $I_C = I_{CQ} = 2 \text{ ma}$, tendremos un voltaje en el colector del transistor de 5 volts y una corriente de base de 40 microamperes aproximadamente, Con este valor podemos encontrar el valor de α y de β :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{2000 \text{ a}}{40 \text{ a}} = 50 ; \quad \beta = 50$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} = \frac{50}{1 + 50} = 0.98$$

En la figura III-13 tenemos las curvas típicas de un tipo de transistor en especial, y sobre ellas se ha trazado la recta de operación del ejemplo visto anteriormente.

AMPLIFICADORES OPERACIONALES.-

Los amplificadores operacionales son usados extensamente para sumar, restar, multiplicar, amplificación diferencial y amplificación integral.

Estas funciones generalmente se derivan del circuito externo y no del propio amplificador operacional (A/O), ya que el mismo A/O puede ser usado para obtener cualquiera de las funciones arriba mencionadas. El símbolo de un A/O es un triángulo como lo vemos en los diagramas correspondientes.

Empezaremos con la configuración más simple, que es la de ganancia proporcional que se muestra en la figura III-14. El A/O de dicha figura es un A/O inversor, lo que nos indica que invierte de polaridad la señal de entrada en la salida. El signo $-K$ nos indica precisamente que se trata de un A/O inversor.

Usaremos el flujo de electrones para todas las explicaciones futu-

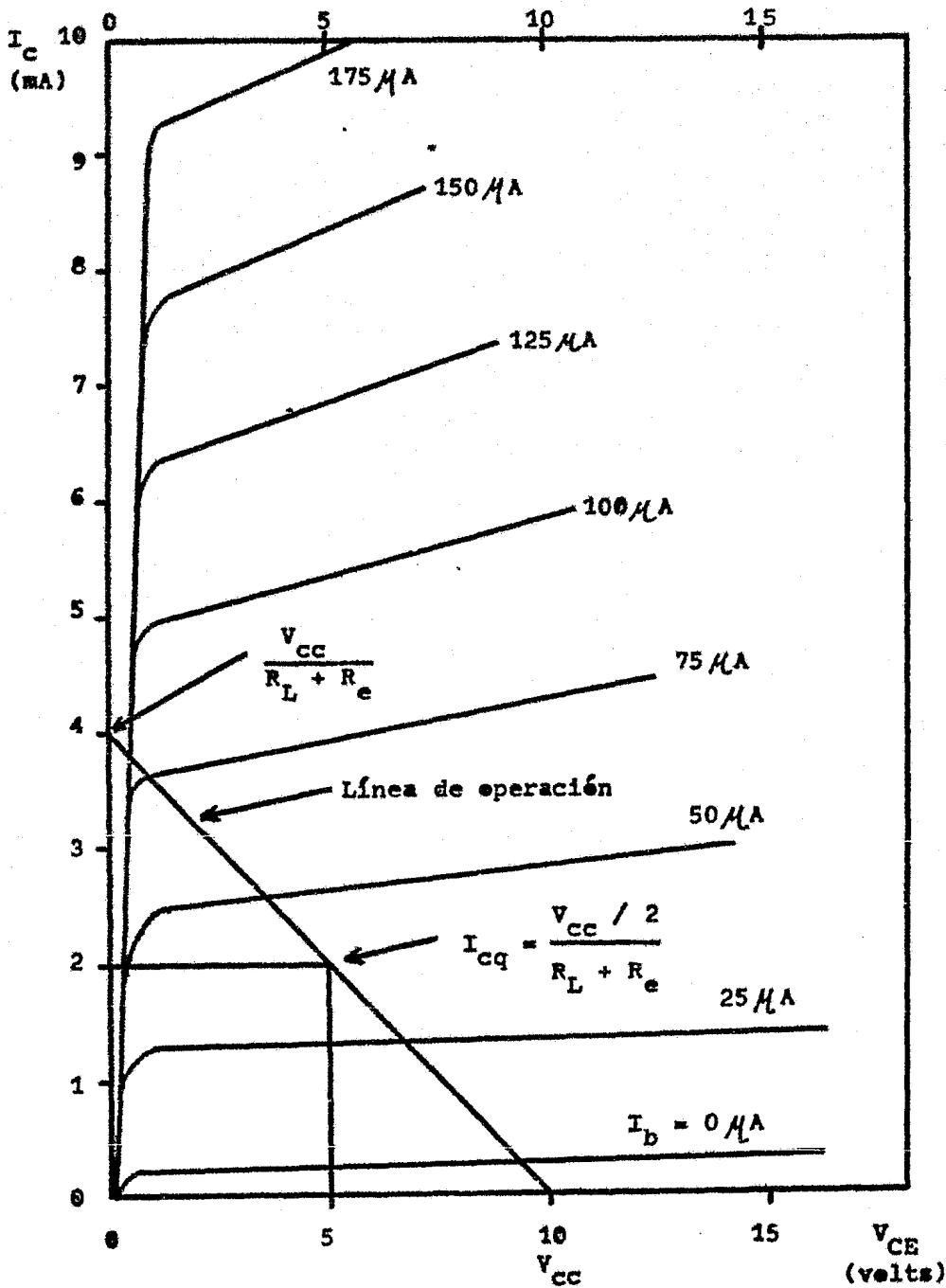


FIGURA III - 13

ras. Las características principales de un A/O son:

- 1.- alta ganancia, del orden de 10^5 para lazo abierto
- 2.- baja impedancia de salida, aproximadamente 100 ohms --
sin retroalimentación
- 3.- alta impedancia de entrada, 100,000 ohms aproximada---
mente
- 4.- 180 grados de inversión de fase, de la entrada a la ---
salida
- 5.- gran ancho de banda

Analizaremos ahora el circuito de la figura III-14 con base en los datos anteriores:

La ganancia K de el A/O es muy alta, por consiguiente se necesita muy poca cantidad de I_{\bullet} y V_{\bullet} para obtener una salida máxima, por lo que puede asumirse que $I_{\bullet} = 0$, y $V_{\bullet} = 0$

Puede demostrarse que I_{\bullet} y V_{\bullet} no son exactamente cero ya que tienen un cierto valor, pero son lo suficientemente pequeños y constantes para un amplificador dado, que pueden despreciarse y asumirse como cero practicamente.

De la figura III-14 tenemos:

$$E_i = V_{\bullet} + I_i Z_i \quad \text{y} \quad -E_{\bullet} = V_{\bullet} + I_f Z_f$$

pero como $V_{\bullet} = 0$

$$E_i = I_i Z_i \quad ; \quad -E_{\bullet} = I_f Z_f \quad \text{despejando } I_i$$

$$I_i = \frac{E_i}{Z_i} \quad ; \quad I_i = \frac{-E_{\bullet}}{Z_f} \quad \text{igualando tenemos:}$$

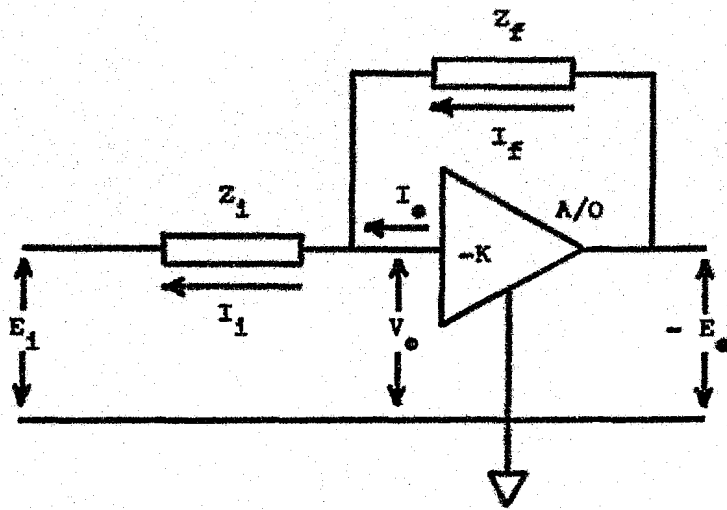


FIGURA III - 14

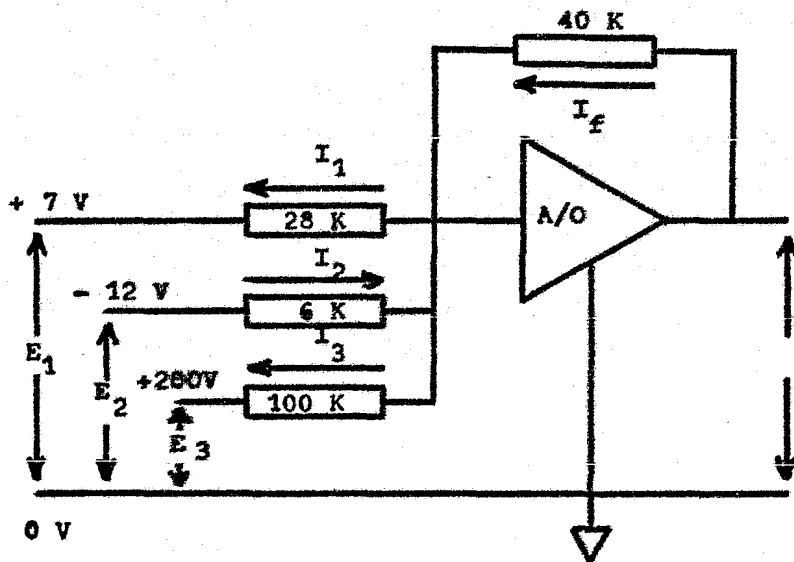


FIGURA III - 15

$$\frac{E_i}{Z_i} = \frac{-E_o}{Z_f} \quad \text{multiplicando en forma cruzada;}$$

$$\frac{Z_f}{Z_i} = \frac{-E_o}{E_i}$$

La fórmula anterior, es la ecuación general de los amplificadores operacionales, y nos dice que la ganancia de voltaje depende solo de la relación entre la impedancia de retroalimentación y la impedancia de entrada, limitada solo por el A/O particularmente empleado.

Ejemplo.- si $Z_i = 10 \text{ k}$, $Z_f = 50 \text{ k}$, $E_i = 2 \text{ volts}$, encontrar el valor de I_i , I_f y E_o .

$$I_i = \frac{E_i}{Z_i} = \frac{2 \text{ volts}}{10 \text{ K}} = 0.2 \text{ ma} = I_f$$

$$-E_o = I_f Z_f = 0.2 \text{ ma} (50 \text{ K}) = 10 \text{ volts} \quad \text{y}$$

$$\frac{-E_o}{E_i} = \frac{10}{2} = 5 = \text{ganancia de voltaje}$$

comprobando con las impedancias:

$$\frac{Z_f}{Z_i} = \frac{50 \text{ K}}{10 \text{ K}} = 5$$

por lo que comprobamos que si se cumplen las fórmulas encontradas.

Amplificador con suma algebraica y ganancia proporcional.-

En la figura III-15 se realizan simultaneamente las funciones de -

suma y multiplicación, del total de la suma o ganancia. La ganancia está dada por :

$$\frac{E_o}{E_i} = - \frac{Z_f}{Z_i} \quad \text{ó} \quad E_o = - E_i \frac{Z_f}{Z_i}$$

y desarrollandola para todas las entradas tenemos:

$$E_o = - E_1 \frac{Z_f}{Z_1} - E_2 \frac{Z_f}{Z_2} - E_3 \frac{Z_f}{Z_3} \text{ sustituyendo valores queda:}$$

$$E_o = - 7 \text{ volts} \frac{40 \text{ K}}{28 \text{ K}} - (-12 \text{ volts}) \frac{40 \text{ K}}{6 \text{ K}} - 200 \text{ volts} \frac{40 \text{ K}}{100 \text{ K}}$$

$$E_o = - 10 + 80 - 80 = - 10 \text{ volts}$$

Veamos ahora una configuración muy usada para controles estáticos en la figura III-16. La impedancia de retroalimentación será para ese circuito:

$$Z_f = R_f + \frac{1}{j\omega C}$$

ya que la impedancia de un capacitor es :

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad \text{demostraremos este}$$

Como sabemos:

$$I_C = C \frac{dV}{dt} \quad \text{sustituyendo por el operador de Laplace -----}$$

$$s = \frac{d}{dt}$$

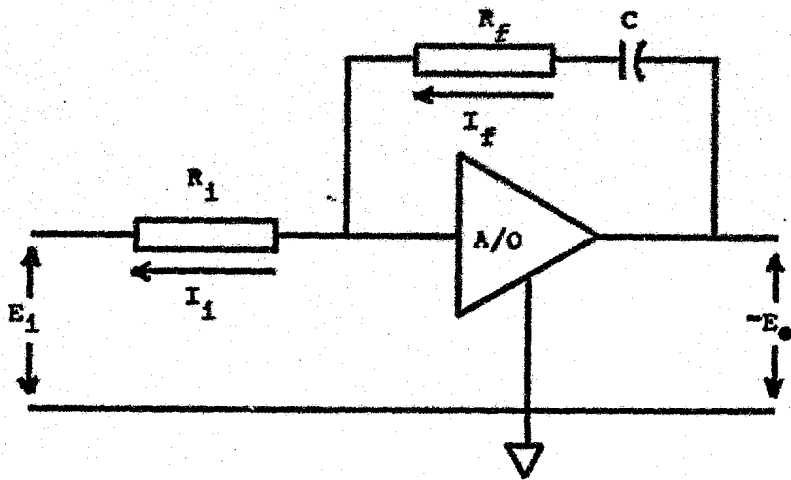


FIGURA III - 16

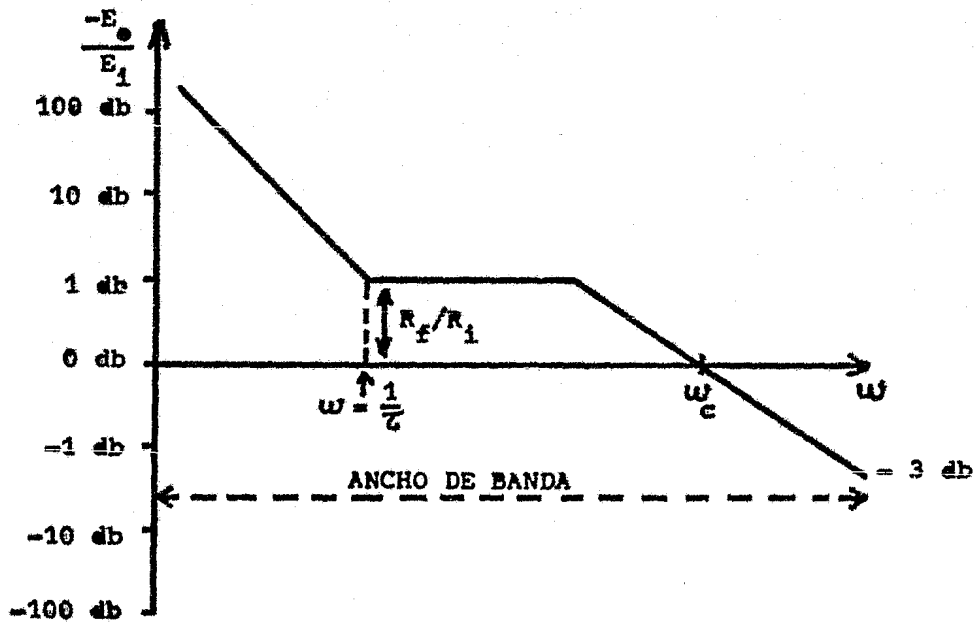


FIGURA III - 17

$I_c = C S V_c$ lo cual podemos arreglar como sigue:

$$\frac{V_c}{I_c} = \frac{1}{CS} = Z_c$$

que es igual a la impedancia del capacitor, para una entrada senoidal sabemos que $S = j\omega$, por lo que finalmente tenemos:

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C}$$

La ganancia del sistema será por consiguiente:

$$\frac{-E_o}{E_i} = \frac{Z_f}{Z_i} = \frac{R_f + \frac{1}{j\omega C}}{R_i} = \frac{R_f j\omega C + 1}{R_i}$$

$$\frac{-E_o}{E_i} = \frac{R_f C j\omega + 1}{R_i C j\omega}$$

al producto $R_f C$ se le conoce como constante de tiempo $\tau = R_f C$, y al sustituirla tenemos:

$$\frac{-E_o}{E_i} = \frac{\tau j\omega + 1}{R_i C j\omega}$$

El diagrama de Bode nos sirve para graficar la ganancia en decibels vs la frecuencia ω , y nos permite examinar la respuesta del amplificador en el sistema con más detalle. Este diagrama lo podemos observar en la figura III-17.

De la ecuación anterior podemos sacar conclusiones importantes ---
como:

si $\omega = 0$ la ganancia del sistema tiende al infinito, por lo que -
este sistema para corriente directa no tendría realimentación ya -
que la impedancia del capacitor sería infinita, $Z_C = 1 / j\omega C$, y
 $Z_C = \text{infinito}$.

La ganancia en decibeles (db) la obtenemos como sigue:

$$db = 20 \log \frac{E_o}{E_i} = 20 \log \frac{Z j\omega + 1}{R_i C j\omega}$$

para bajas frecuencias los términos con ω , son pequeños y predomi-
na el término +1, por lo que la ganancia es alta y va disminuyen-
do conforme aumenta la frecuencia.

Al llegar al valor $\omega = 1 / \tau$, hay un cambio radical en la pen-
diente; debido a que continúa creciendo llega un momento en que
el término +1 se hace insignificante y puesto que el término $Cj\omega$
es común en numerador y denominador, lo podemos eliminar quedando:

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{R_f}{R_i}$$

La ecuación anterior es la función de transferencia del A/O para -
altas frecuencias. podemos decir entonces que la ganancia a altas
frecuencias está determinada solo por la relación R_f / R_i ya que -
el capacitor tiende a convertirse en corte circuito a frecuencias
altas.

si se continúa elevando la frecuencia ω , llega a un punto en que
la curva comienza nuevamente a descender, cruzando la línea de re-
ferencia vertical cuando $\omega = \omega_c$ también llamado punto ó frecuen-
cia de corte ó cruce.

El ancho de banda del diagrama de Bode mostrado llega hasta que la
curva se encuentra a - 3 db de la línea horizontal.

Por último tenemos otras dos configuraciones menos comunes en los

centrales estáticas para metros de C.D. y se muestran en las figuras III-18 y III-19.

La ecuación característica del integrador de la figura III-18 es - la siguiente:

$$E_{\bullet} = - \frac{1}{R_i C} \int E_1 dt$$

La ecuación característica del diferenciador de la figura III-19 - es la siguiente:

$$E_{\bullet} = - R_f C \frac{dE_1}{dt}$$

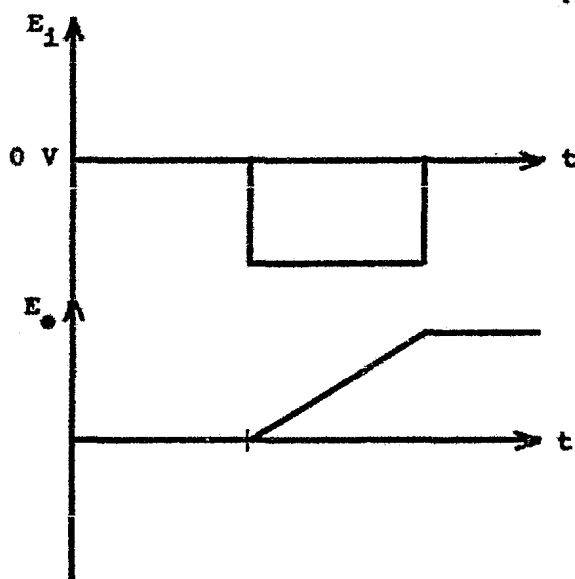
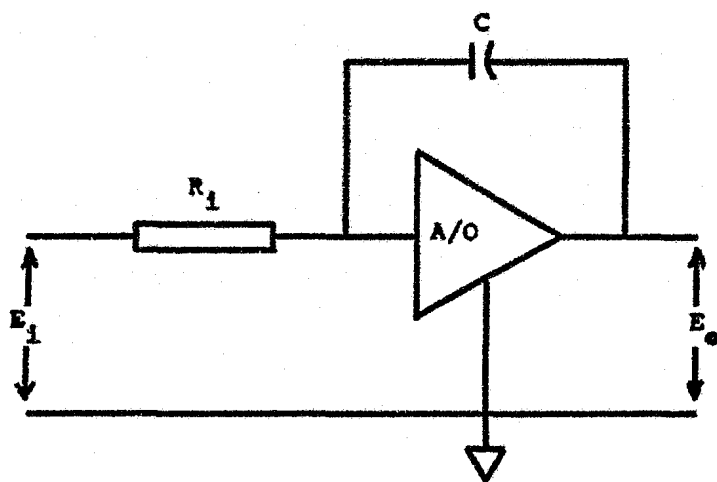


FIGURA III - 18

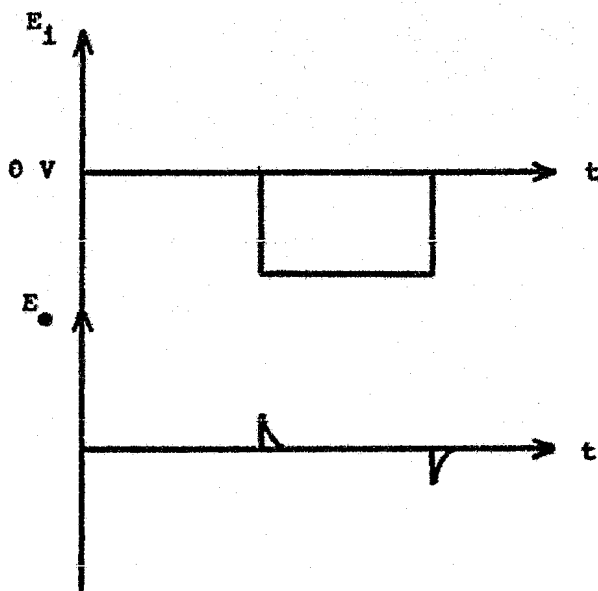
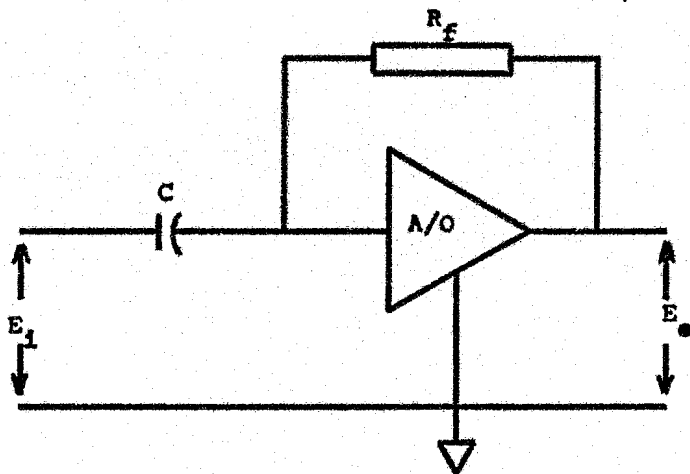


FIGURA III - 19

CAPITULO IV : SISTEMAS DE CONTROL ESTATICO

INTRODUCCION.-

El objetivo de cualquier servosistema, es controlar alguna variable y medir la respuesta de dicha variable a un comando conocido ó referencia de entrada. Se debe comparar dicha referencia con una retroalimentación, que provenga de la variable controlada la cual puede ser; velocidad, voltaje, corriente, tensión, posición e ---- cualquier otra variable. La retroalimentación debe compararse con la referencia en las mismas unidades (volts, amperes, etc.). Si no se pueden obtener facilmente las mismas unidades para la retroalimentación se debe entonces utilizar un transductor para hacerlas compatibles. Algunos transductores conocidos son; tacómetros, ---- shunts, reactores, potenciómetros, transductores de presión y medidores de flujo.

En controles para motores de C.D., la referencia y la retroalimentación usualmente están en volts e en amperes, los reguladores trabajan sin embargo con milivolts y miliamperes por lo que las señales comparadas deben atenuarse antes de entrar al control. Los ---- elementos básicos necesarios para tener un sistema controlado se muestran en la figura IV-1 .

Este sistema de lazo cerrado consiste de una referencia e comando, una retroalimentación, señal de error, controlador, la potencia ---- que proporciona el controlador, el aparato controlado, la variable controlada, y un transductor que genera la retroalimentación.

En la mayoría de los casos el comando es un potenciómetro, que en los tableros de control se le pone la leyenda "velocidad", "voltaje", "tensión", e cualquier otra variable que se esté controlando. La señal de error es el resultado de comparar las señales de comando y retroalimentación. Se puede decir que el comando ordena al sistema lo que debe hacer, la retroalimentación representa lo que el sistema está haciendo, el error es la diferencia de señales, el cual hace actuar al controlador para entregar más e menos potencia al aparato controlado y cambia la variable controlada de tal mane-

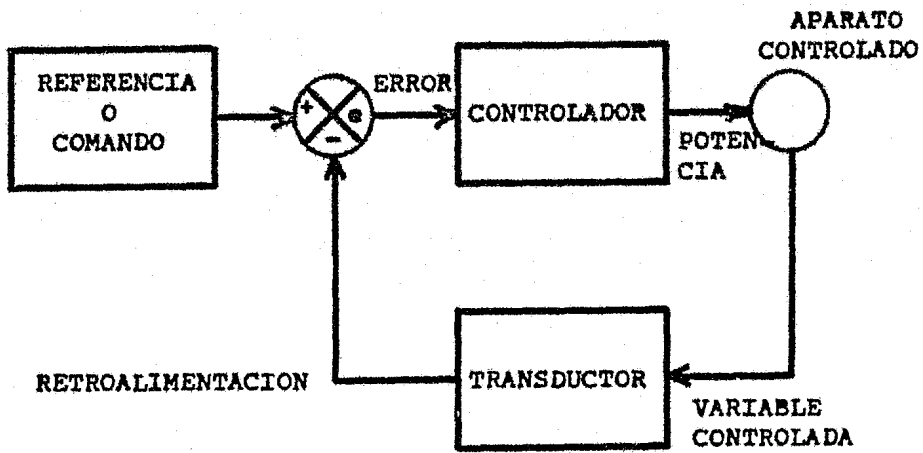


FIGURA IV - 1

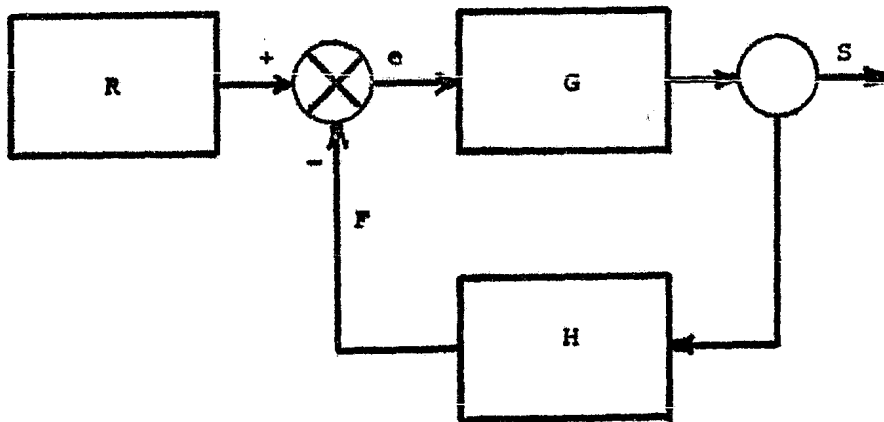


FIGURA IV - 2

ra que el transductor generará ahora una retroalimentación que tenderá a reducir el error original hasta llegar a un estado estable. El controlador tiene una gran ganancia de potencia y es capaz de sobrepasar la capacidad del aparato controlado, por lo que se deben usar funciones que limiten la potencia entregada, para prevenir daños al aparato controlado.

La figura IV-1 se aplica de igual manera a sistemas eléctricos, hidráulicos, neumáticos, o mecánicos. En seguida tenemos una tabla de servosistemas típicos y su equivalencia con el modelo visto:

SISTEMA	AUTOMOVIL	CALENTADOR	REGULADOR DE VOLTAJE
Referencia ó comando	pedal del acelerador	posición del termostato	posición del potenciómetro
retroalimentación	lectura del velocímetro	temperatura medida	voltaje de armadura
error	lectura del velocímetro vs. velocidad deseada	posición del termostato vs. temperatura medida	comparación de voltajes
controlador	humano	valvula de gas	control estático de C.D.
potencia	flujo de gasolina	calor	corriente alterna rectificada.
aparato controlado	máquina del automóvil	quemador del horno	motor de C.D.
variable controlada	velocidad	calor en el horno	voltaje de armadura
transductor	velocímetro	termómetro	resistencia ó shunt

Para entender la operación del regulador necesitamos definir matemáticamente su operación. El regulador siempre toma la forma de la figura IV-2 .

En esa figura las letras nos representan lo siguiente:

- R = referencia o comando del sistema
- F = retroalimentación del proceso
- G = ganancia del sistema, representa la capacidad del regulador para convertir señales pequeñas en salidas compatibles con la potencia del aparato controlado.
- e = representa la señal de error ó diferencia entre el comando dado al sistema y su funcionamiento actual.
- S = es la salida del regulador o variable controlada.
- H = nos representa el transductor, que hace posible comparar la variable controlada con la señal de referencia en las mismas unidades.

De acuerdo con lo señalado podemos establecer las siguientes relaciones:

$$e = R - F \quad ; \quad S = G e \quad ; \quad Y \quad F = H S$$

trataremos ahora de encontrar la relación S / R en función de G y H únicamente:

$$S = F / H \quad , \quad F = R - e$$

$$S = \frac{R - e}{H} \quad \text{pero } e = S / G \quad \text{y} \quad H = F / S$$

$$S = \frac{R - S / G}{H} \quad \text{y} \quad F = H S$$

$$S = \frac{R - S / G}{H S / S} = \frac{R - S / G}{H}$$

$$S H = R - S / G \quad ; \quad S H + S / G = R \quad ; \quad S(H + 1 / G) = R$$

$$\frac{S}{R} = \frac{1}{H + 1/G} = \frac{1}{GH + 1} = \frac{G}{1 + GH}$$

$$\frac{S}{R} = \frac{G}{1 + GH}$$

La situación ideal en el sistema sería que la relación S / R fuera constante, e sea que la variable controlada siempre obedeciera --- fielmente a la señal de comando.

Veamos ahora como afectan al sistema los cambios que pueden ocu--- rrir en los valores de G y H.

Suponiendo que G = 1000 y H = 1 tendríamos entonces en la rela--- ción encontrada anteriormente:

$$\frac{S}{R} = \frac{1000}{1 + 1000(1)} \approx 1$$

si aumentamos el valor de G en un 10 % (G = 1100) tendremos:

$$\frac{S}{R} = \frac{1100}{1 + 1100(1)} \approx 1$$

aumentando ahora un 10 % el valor de H (H = 1.1) con el valor --- original de G = 1000, tendremos:

$$\frac{S}{R} = \frac{1000}{1 + 1000(1.1)} = 0.9$$

De lo anterior podemos deducir que si la relación de G a H es muy alta (del orden de 1000 a 1), las variaciones de G tienen poco --- efecto en el sistema, y las variaciones de H producen casi la mis--- ma variación en el sistema S / R.

Definiremos en seguida ciertas características que pueden ser apli--- cadas a cualquier tipo de regulador.

1.- RESPUESTA.-

La respuesta de un sistema regulador puede medirse según el tiempo de retraso, entre el tiempo en que el sistema ve una señal de error "e" debido ya sea a un cambio en la salida S o en la referencia R, y el tiempo en que se llega a la nueva condición. A este tiempo se le conoce como constante de tiempo, puede ser muy largo (del orden de 5 segundos) o muy corto (hasta 0.002 segundos), ésta constante dependerá de que tan lento o rápido sea el sistema.

2.- RUIDO.-

El ruido que se introduce a los reguladores, puede afectar su funcionamiento, por lo que es recomendable tener una relación señal/ruido aceptable.

Cuando tenemos un regulador que maneja niveles de señales del orden de volts y miliamperes, es más probable la interferencia de ruido que cuando se manejan niveles como el sistema Ward Leonard de 240 volts generalmente, y corrientes mayores de un amper.

3.- FLOTACION (DRIFT).-

La flotación (drift) en un regulador, es uno de los mayores problemas asociados a los sistemas industriales y significa la incapacidad del regulador para mantener un punto de operación dado. Lo anterior puede suceder por tres causas:

- a).- variación ó flotación de la fuente de voltaje
- b).- variación en el circuito de retroalimentación
- c).- variación en la cantidad de flujo magnético en el devanado de campo debido a su calentamiento

4.- GANANCIA.-

Un sistema con una ganancia extremadamente alta puede decirse que es muy sensible y cuando tiene demasiada ganancia puede ocasionar inestabilidad. Por otro lado un sistema con muy poca ganancia tiende a ser muy lento.

La inestabilidad de los sistemas de alta ganancia, se debe a que -

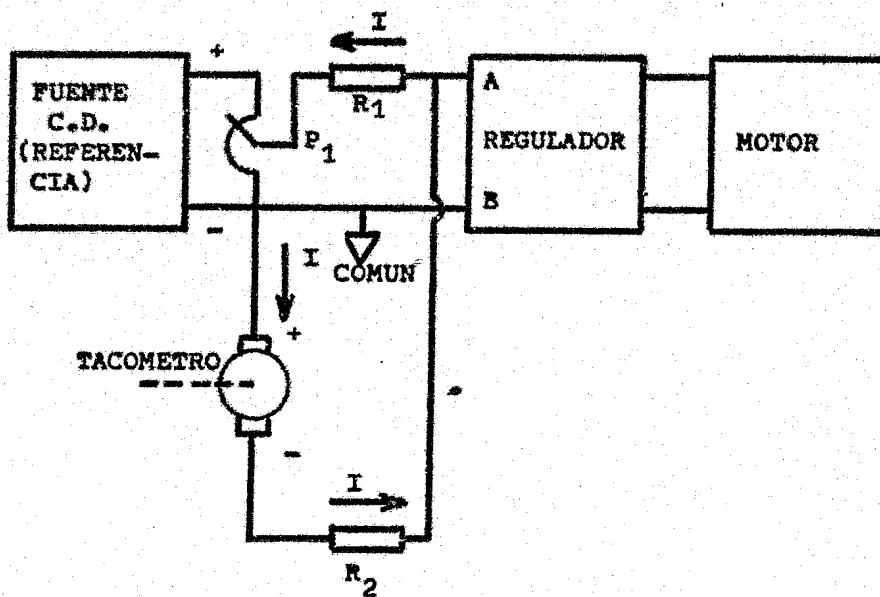
manejan señales de error muy pequeñas y cualquier variación in-
significante ocasiona grandes cambios en la salida del regulador,
cabe decir que en los sistemas de poca ganancia que necesitan
grandes variaciones en la señal de error para provocar un cambio
en la salida. En seguida se muestra un cuadro con cinco diferentes
tipos de reguladores en orden de su antigüedad en la industria, y
que nos da una idea de sus diferencias.

regulador variable	sistema Ward Leo- nard	sistema retatorio	de bulbos	con reac- tores sa- turables	estado solido
RESPUESTA	Pobre	suficiente	muy buena	suficiente	alta
GANANCIA	pobre	media	muy alta	adecuada	poco alta
FLOTACION (DRIFT)	mala	mala	pobre	poca	ninguna
RUIDO	insensi- tive	insensi- tive	muy sensi- tive	poca	insensi- tive
MANTENIMI- ENTO : MECANICO ELECTRICO	pobre buena	pobre complejo	bueno pobre	ninguno caro	poco rápido, fá- cil, mínimo
FLEXIBILI- DAD	flexible	limitada	bueno	bueno	muy bueno
COSTO	bajo	bajo	alto	alto	moderado
PROBLEMAS FRECUENTES	casi ninguno	escobillas	bulbos, tierras	flotación, diodos	fallas de tipo es- tático
ESPERANZA DE VIDA	ilimitado	reparable pero caro	imprede- cible	limitado	ilimitado

FUNCIONAMIENTO DE LOS CONTROLES ESTATICOS DE C.D.-

Referencia y retroalimentación.-

Para comparar prácticamente la señal de referencia con la señal de retroalimentación en un control estático de velocidad, usamos el principio de entradas paralelas como se muestra en la figura IV-3. En el circuito equivalente en la figura IV-3, el tacómetro y el voltaje de referencia están conectados en serie aditiva, las resistencias R_1 y R_2 también están en serie con el circuito y las terminales A y B son las terminales de entrada al regulador.



UN CIRCUITO EQUIVALENTE ES EL SIGUIENTE :

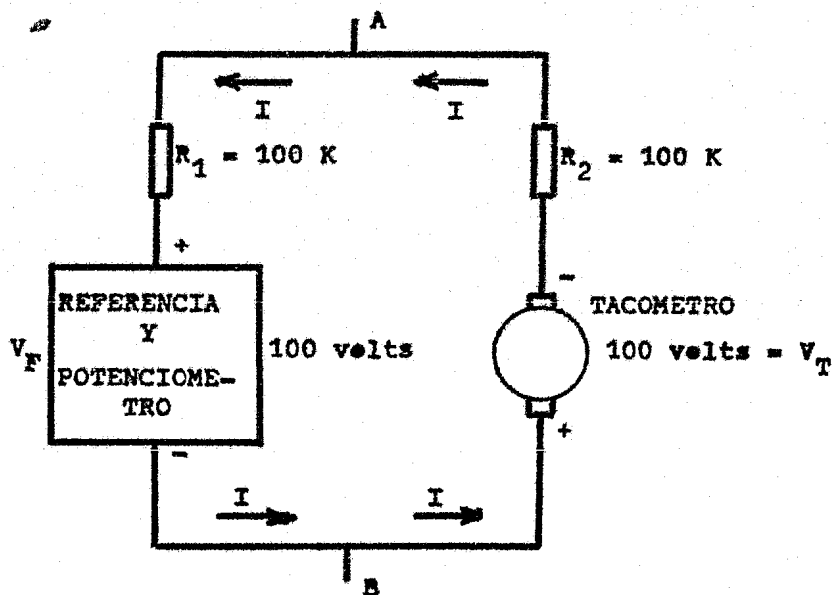


FIGURA IV - 3

calculando ahora la corriente en la malla (despreciando las impedancias de la fuente y del tacómetro) y dando los valores siguientes:

$$R_1 = R_2 = 100 \text{ K}$$

$$V_f = V_t = 100 \text{ volts}$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{100 \text{ v} + 100 \text{ v}}{100 \text{ K} + 100 \text{ K}} = 1 \text{ ma}$$

una vez obtenida la corriente $I = 1 \text{ ma}$, podemos obtener las caídas de voltaje y polaridades de las resistencias del circuito.

$$V_{R1} = R_1 I = 100 \text{ K} (1 \text{ ma}) = 100 \text{ volts}$$

$$V_{R2} = R_2 I = 100 \text{ K} (1 \text{ ma}) = 100 \text{ volts}$$

las polaridades se muestran en la figura IV-4, en dicha figura podemos dar cuenta que la diferencia de potencial entre las terminales A y B son cero volts, $V_{AB} = 0 \text{ volts}$, lo que se puede comprobar con las dos ramas del circuito.

A las resistencias R_1 y R_2 generalmente se les llama resistencias de suma, cambiando el valor de las resistencias se puede dar un cierto peso a una señal en particular.

Suponiendo que ahora tenemos un incremento de carga en el motor por lo que reduce su velocidad y debido a ello el tacómetro solo genera 96 volts, calculando nuevamente la corriente en la malla para los mismos valores de resistencias y fuente de referencia, tendremos:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{100 \text{ v} + 96 \text{ v}}{100 \text{ K} + 100 \text{ K}} = \frac{196 \text{ volts}}{200 \text{ K}} = 0.98 \text{ ma}$$

observando ahora las caídas de voltaje y polaridades de las resistencias:

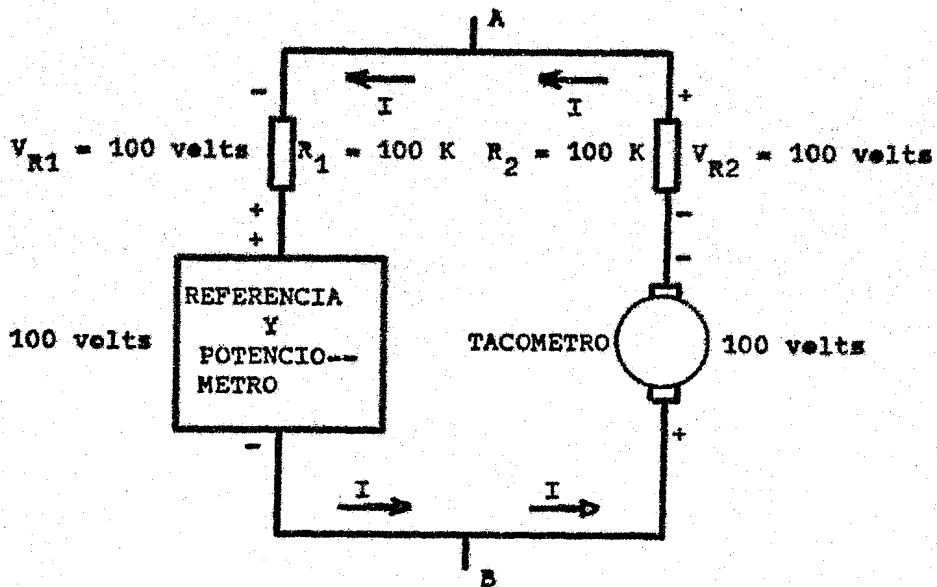


FIGURA IV - 4

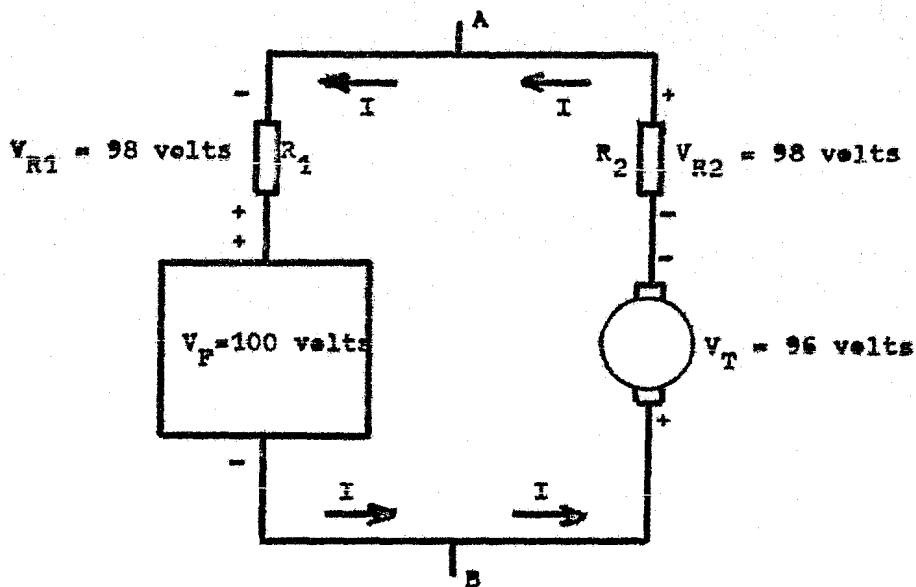


FIGURA IV - 5

$$V_{R1} = R_1 I = 100 \text{ K} (0.98 \text{ ma}) = 98 \text{ volts}$$

$$V_{R2} = R_2 I = 100 \text{ K} (0.98 \text{ ma}) = 98 \text{ volts}$$

colocando estos valores en el circuito, vemos lo que pasa en la -- figura IV-5 , sumando algebraicamente la rama izquierda para obtener el voltaje V_{AB} tenemos:

$$V_{AB} = 100 \text{ v} - 98 \text{ v} = 2 \text{ volts}$$

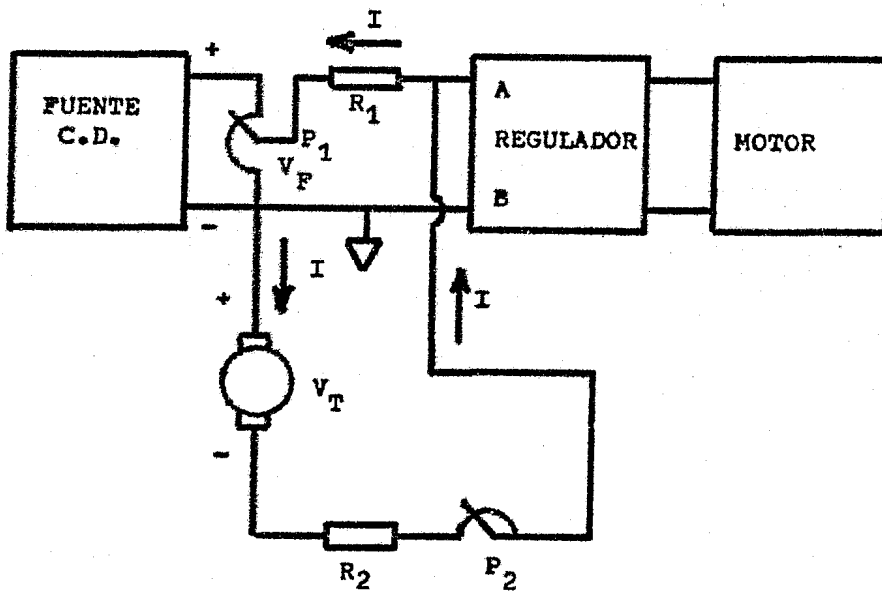
y sumando la rama derecha tenemos:

$$V_{AB} = 98 \text{ v} - 96 \text{ v} = 2 \text{ volts}$$

El resultado que obtenemos es un voltaje $V_{AB} = 2 \text{ volts}$ positivo, -- por lo que el regulador se encenderá más, incrementando la velocidad del motor hasta que el tacómetro produzca nuevamente 100 volts regresando a la condición inicial de $V_{AB} = 0 \text{ volts}$.

Control de máxima velocidad.-

intercalando un potenciómetro de un 20 % del valor de la resistencia R_2 en la rama del tacómetro, podemos controlar la máxima velocidad deseable del motor de C.D., el circuito se muestra en la figura IV-6. En dicha figura cuando el potenciómetro P_2 se gira a la mitad de su valor (10 K), la resistencia equivalente de la rama -- del tacómetro será de $90 \text{ K} + 10 \text{ K} = 100 \text{ K}$, por lo que la entrada -- al regulador V_{AB} será cero. Si el potenciómetro P_2 se coloca en su máximo valor (20 K), la resistencia equivalente de la rama del -- tacómetro será de $90 \text{ K} + 20 \text{ K} = 110 \text{ K}$ por lo que el tacómetro ---- tendrá que generar 110 volts para alcanzar la corriente de 1 ma -- que es la que nos produce $V_{AB} = 0$, debido a ello el motor ten---- drá que girar más rápido para que el tacómetro genere más y alcanzar la estabilidad, el caso contrario ocurre cuando el potenciómetro se coloca en su mínimo valor (0 ohms) por lo que el tacómetro



EL CIRCUITO EQUIVALENTE ES EL SIGUIENTE :

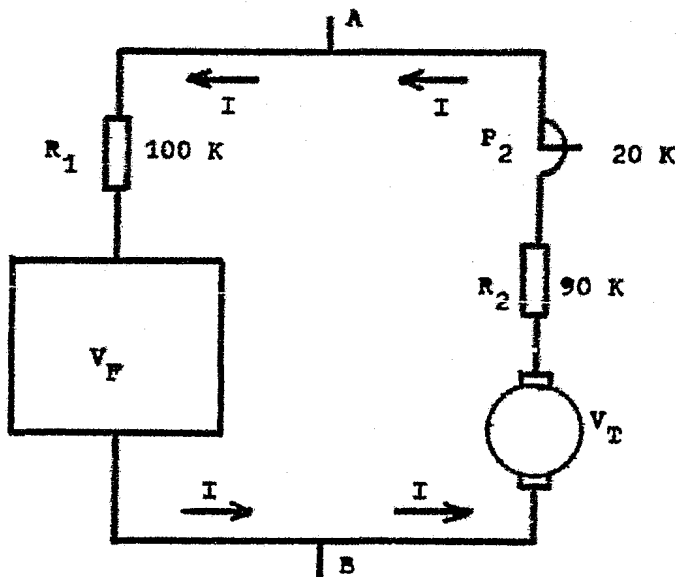


FIGURA IV - 6

solo tendrá que generar 90 volts para proporcionar 1 ma de corriente que nos produzca $V_{AB} = 0$, debido a ello el motor girará más despacio.

con el potenciómetro P_1 se controla el voltaje de referencia y es el voltaje que controla la velocidad del motor. Si el voltaje es nulo, la velocidad será cero y si el voltaje es máximo se tendrá la máxima velocidad en el motor (cuyo valor máximo se controla con el potenciómetro P_2 como ya se vió).

CIRCUITO DE UN CONTROL DE VELOCIDAD TIPICO.-

Enseguida trataremos de describir como funciona un control estático de velocidad variable para motores de C.D.

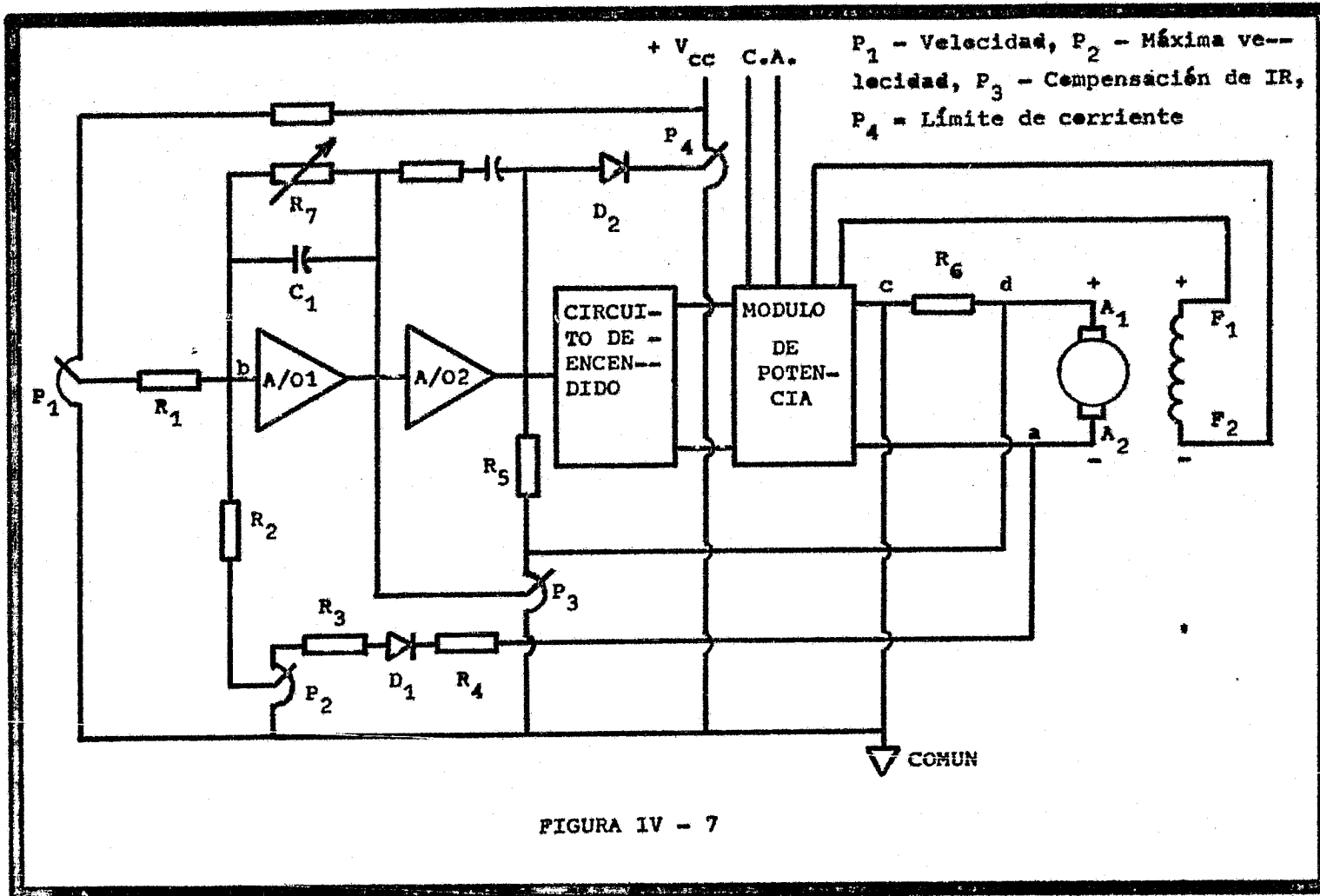
En la figura IV-7 se presenta un circuito típico de este tipo de controles.

Del circuito de esta figura podemos darnos cuenta que la señal de referencia (o de velocidad) entra a un amplificador operacional A/O , donde es amplificada y enviada a un segundo amplificador operacional y luego a un circuito de encendido. Del circuito de encendido pasa al módulo de poder que proporciona la potencia al motor de C.D. A continuación se detallan más los bloques del control.

La referencia de velocidad se proporciona con el potenciómetro P_1 llamado velocidad y se suma a través del resistor R_1 como la señal de mando al primer amplificador operacional.

Para este control que estamos viendo, el común nos indica que es una conexión común para todas las fuentes de poder, señales y ajustes, y no se debe confundir con la "tierra", ya que si se conectara a tierra, crearia un problema en el circuito del motor.

En la figura IV-7 podemos observar que se toma una señal en el punto a (que es la terminal negativa de la armadura) que va al potenciómetro P_2 de máxima velocidad, a través de un diodo (D_1) y dos resistores (R_3 y R_4). La finalidad del diodo es dejar pasar solo señales negativas. La señal en cuestión es la retroalimenta-



ción del voltaje de armadura y dependiendo de la posición de P_2 - será la corriente que se sumará a través de la resistencia R_2 a la entrada del primer amplificador operacional donde la referencia de velocidad está llegando.

En ese punto (b) se suman las dos señales, ocasionando un voltaje de error, este voltaje nos representa a escala pequeña, la diferencia entre el voltaje de armadura existente y el deseado.

Si las dos señales no son iguales (en magnitud, pero diferentes en polaridad), el error es amplificado y el módulo de poder debe modificar su salida para satisfacer el voltaje deseado.

ya sea que el motor sea acelerado por un aumento en el voltaje de armadura o sea frenado por una disminución. ocurre un cambio del par del motor, este nos produce una señal que se realimenta a la entrada del segundo A/O a través del potenciómetro P_3 de compensación (compensa la caída de voltaje en la armadura por el efecto de la resistencia de armadura IR_a).

El resistor R_6 nos proporciona la señal de corriente, ya que la caída de voltaje en dicho resistor es directamente proporcional a la corriente de armadura, puesto que está en serie en este circuito.

El potenciómetro P_3 se puede ajustar para dar una entrada adicional al segundo A/O en proporción directa a la caída de voltaje por resistencia de armadura en el motor (IR_a).

Para un control de velocidad con compensación por IR, usando un esquema de regulador de voltaje, se puede obtener una regulación de velocidad cercana al 3 %, sin embargo se debe recalcar que solo será cierta para una velocidad en particular, por lo que el 3 % no se mantendrá en todo el rango de velocidades.

Resumiendo lo visto hasta ahora; la señal de referencia ha sido comparada a la retroalimentación, el error resultante es amplificado y sumado a la entrada del segundo amplificador junto con la señal de compensación de IR.

El segundo amplificador realiza una función matemática de integra-

ción de las señales sumadas y proporciona una referencia de par -- en su salida, esta referencia de par es representativa de la cantidad de par requerido para lograr los resultados deseados. Si el -- motor está girando a una velocidad menor que la deseada, entonces el par debe aumentar para acelerar al motor a la nueva velocidad, si por el otro lado el motor está girando a una velocidad mayor -- que la deseada, el par debe disminuir para que la velocidad baje -- al nivel deseado.

La misma señal del resistor R_6 es realimentada a la salida del segundo A/O a través del resistor R_5 , como una retroalimentación de par y es sumada con polaridad opuesta a la señal de referencia de par que fué desarrollada por dicho amplificador. Esta realimentación de corriente es también una señal estabilizadora y un "lazo menor" dentro de otro lazo. La señal de error de par resultante, -- es alimentada a la entrada del circuito de encendido de los thyristores, el propósito de este circuito es el de obedecer al error de par y generar pulsos de encendido con un defasamiento apropiado a las necesidades actuales del circuito, en el módulo de poder --- donde se encuentra el arreglo de thyristores.

Los circuitos de encendido más utilizados son; con reactores saturables, circuitos de encendido rápido utilizando ondas cuadradas y rampas, y con un tren de pulsos.

En la entrada del circuito de encendido se encuentra conectado el diodo D_2 que va al potenciómetro P_4 de límite de corriente, con el cual se ajusta el límite máximo de corriente de armadura que suministrará el control estático, esto es una protección en caso de -- que el par de la carga supere al par máximo del motor.

La manera como actúa el circuito limitador de corriente es el siguiente; el voltaje a la salida del segundo A/O no puede ser mayor que el voltaje en el cursor de P_4 ya que el diodo D_2 se polarizaría en forma directa y conduciría, amarrando el voltaje de salida del A/O número dos, al voltaje ajustado con P_4 , por lo que pode--

mos deducir que con P_4 se ajusta la máxima corriente de armadura - que puede tomar el motor en caso de sobrecarga, si el ajuste de P_4 es incorrecto el motor puede dañarse.

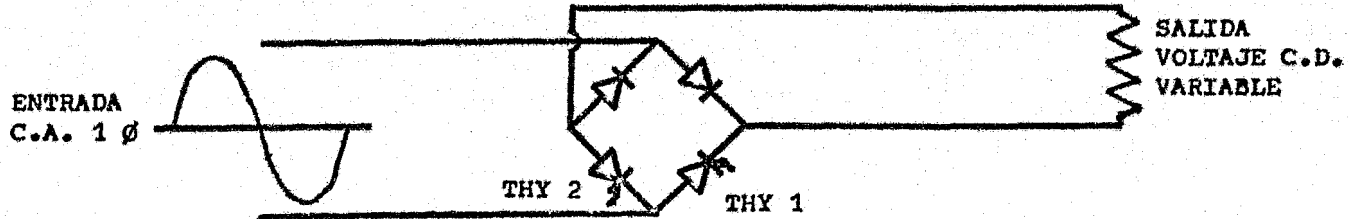
Para este control estático en particular, vemos que la alimenta- ción de corriente alterna es monofásica, pero dependiendo de la - capacidad puede ser trifásica. En tal caso la disposición de los - thyristores es diferente. En las figuras IV-8 y IV-9 podemos ver - la diferencia entre ambas, así como el proceso de encendido de los thyristores.

Por lo general se emplea un puente rectificador con diodos, inde- pendentemente del rectificador de thyristores controlado, para -- suministrar la fuente de corriente directa necesaria para alimen- tar el devanado del campo, aunque excepcionalmente y para casos -- muy particulares también se emplea un rectificador controlado para debilitar el campo magnético.

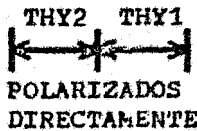
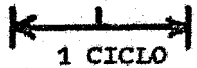
Control del tiempo de aceleración.-

El control del tiempo de aceleración nos da un medio para arrancar una máquina con mayor suavidad que un arranque con corriente limi- tada. Cuando una máquina se arranca bajo el principio de corriente límite, significa que el motor generará 150 % de par a plena carga hasta que el motor alcanza la velocidad que está ordenando el po- tenciómetro de velocidad, en un tiempo mínimo, lo que ocasiona que las partes de la máquina (engranes, cadenas, bandas, rodamientos, etc.) se vean sujetos a muy altos esfuerzos. En el caso de proce- sos que requieren de varios controles estáticos sería virtualmente imposible coordinar la aceleración de los motores.

Por las razones expuestas arriba, es ventajoso controlar el tiempo de aceleración de la máquina. Esto se hace generalmente a un nivel de corriente por debajo de la corriente límite, lo que origina una aceleración más suave, menos esfuerzos en las partes de la máquina y permite la coordinación de dos o más controles estáticos que --- aunque esten manejando diferentes cargas, tendrán la misma razón - de aceleración (RPM'S / seg.).



● 180 360 GRADOS ELECTRICOS



PULSOS DE DISPA-
RO APLICADOS CON
POCO ANGULO DE -
RETRASO



SALIDA
VOLTAJE C.D.

PULSOS DE DISPA-
RO APLICADOS CON
MUCHO ANGULO DE
RETRASO



SALIDA
VOLTAJE C.D.

FIGURA IV - 8

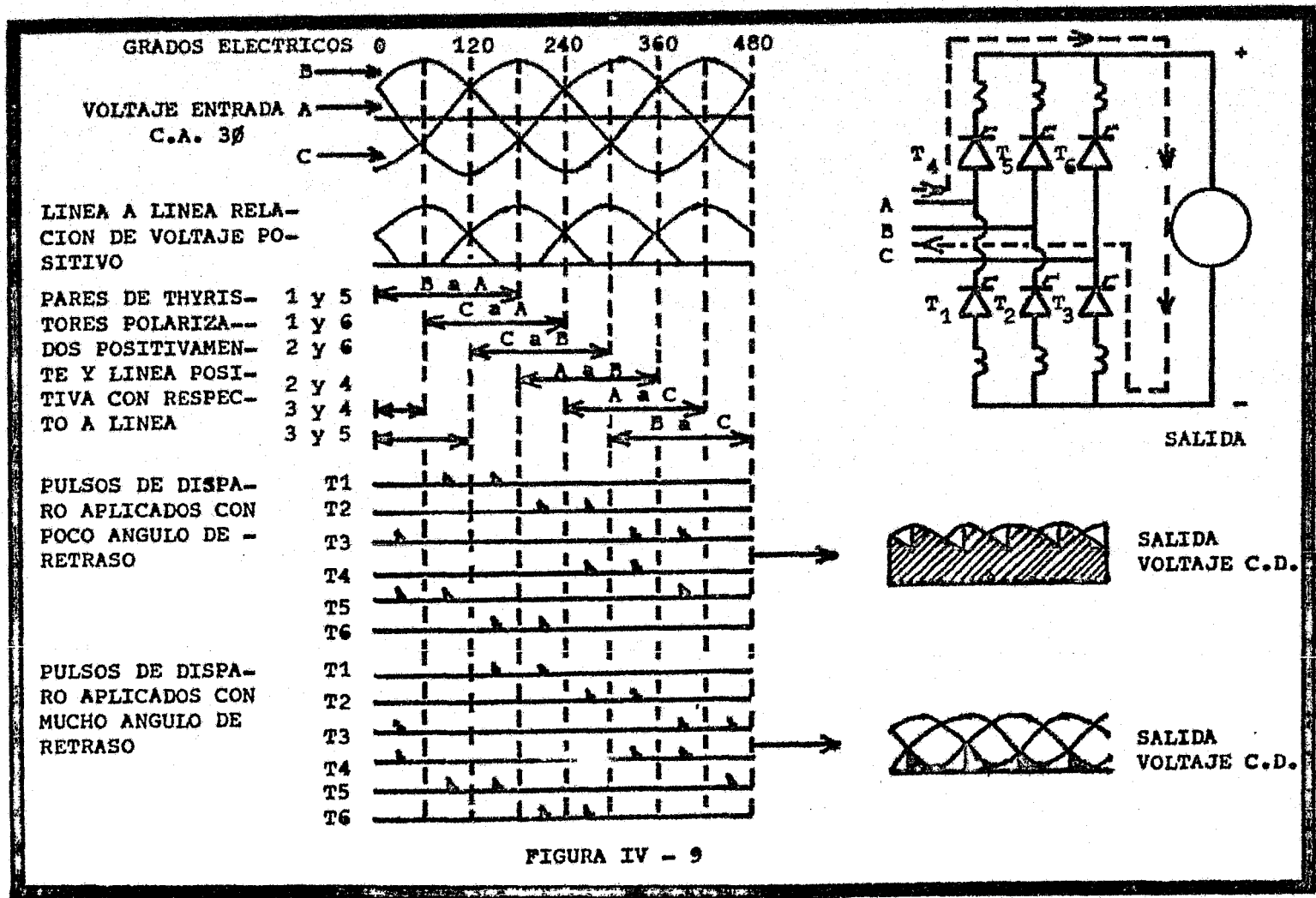


FIGURA IV - 9

El control del tiempo de aceleración se logra con un circuito RC - colocado en la entrada de referencia del control, puesto que el -- capacitor es fijo en su valor, el resistor es ajustable de tal manera que el tiempo de aceleración se pueda ajustar, este circuito RC está formado por R_7 y C_1 de la figura IV-7. La carga en el capacitor representa la entrada de referencia al control, el capacitor se carga a través del resistor variable.

El tiempo en segundos que se requiere para que el capacitor se --- cargue al valor ordenado por el potenciómetro de velocidad, puede ser controlado con el resistor variable. De esta manera se pueden obtener valores de 1 hasta 20 segundos aproximadamente. Debe ha--- cerse notar que la curva de aceleración no es lineal en este caso, sin embargo si el proceso requiere de una curva de aceleración --- lineal, se puede obtener con un circuito más sofisticado en que el capacitor se carga a través de una fuente de corriente constante - en lugar del resistor.

Hasta este punto hemos visto; señales de referencia, de retroali--- mentación, de comparación, voltajes de error y otros aspectos de - un control electrónico de C.D. pero solamente como una caja. A --- continuación veremos las conexiones externas que se hacen a los -- controles para formar distintas configuraciones de acuerdo a las - necesidades del proceso en cuestión.

REGULADOR DE VOLTAJE.-

La mayoría de los controles estandar, usan la configuración de regulador de voltaje que vemos en la figura IV-10. Ahí podemos ver - que el control de C.D. se representa como un bloque, y las cone--- xiones externas son las que lo hacen finalmente un regulador de -- voltaje.

En el lado izquierdo vemos el potenciómetro que da la señal de --- comando o referencia, el que no viene integrado en el control es--- tático sino que por lo general está instalado en la consola del -- operador de la máquina. Después vemos la alimentación de corriente

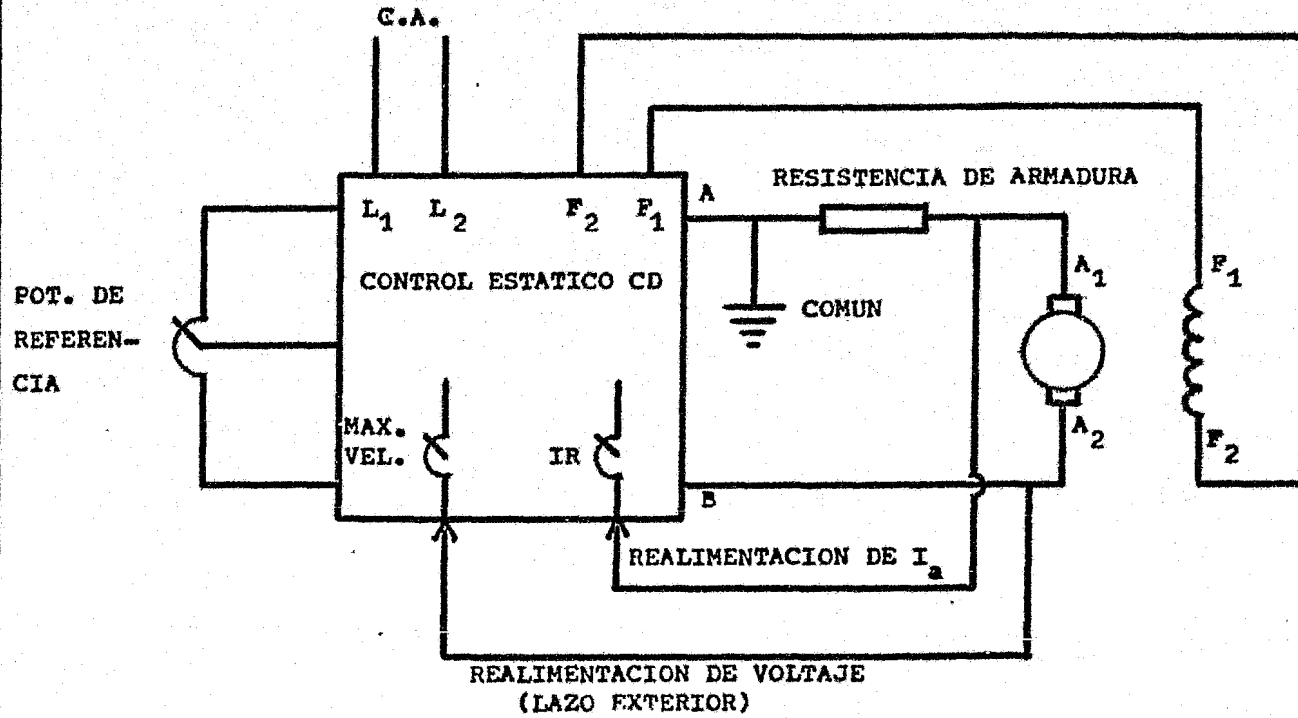


FIGURA IV - 10

alterna cuyo voltaje varía según la capacidad del control y puede ser monofásico ó trifásico. Los valores de voltaje utilizados generalmente son 127, 220 y 440 volts.

La alimentación de corriente directa para el devanado de campo generalmente es de un valor fijo y solo en aplicaciones especiales se aplica un voltaje variable. La Corriente para el campo se obtiene de un rectificador fijo con diodos.

La potencia para mover el motor de C.D. se obtiene de las salidas del control A y B, entre estas terminales se produce un voltaje controlado de C.D. cuyo valor depende del ángulo de disparo de los thyristores, y el cual está regulado precisamente por el control de C.D. según la señal de referencia.

En el circuito de armadura se encuentra intercalada una resistencia en serie ó shunt de armadura, que nos da una pequeña caída de potencial, proporcional a la cantidad de corriente que circula por la armadura y de la que obtenemos una señal de realimentación de corriente que se reintegra al control de C.D. por la terminal D formando el lazo interno o menor del regulador.

La realimentación de voltaje la obtenemos directamente de la armadura y se conecta al control por la terminal C. Este es el lazo exterior del regulador y es el que da el nombre a esta configuración.

Este arreglo es el más simple de todos y puede satisfacer cualquier proceso que no necesite una regulación mejor que el 5 % (regulación de velocidad).

La regulación no puede mejorarse usando este tipo de regulador ya que en realidad se está regulando el voltaje y en forma indirecta la velocidad. Sabemos que:

$$V_t = FCEM + I_a R_a = K_m \phi N + I_a R_a \quad \text{donde;}$$

V_t = voltaje entre las terminales A y B

FCEM = fuerza contraelectromotriz

I_a = corriente de armadura

R_a = resistencia de armadura

K_m = constante de construcción del motor

ϕ = flujo magnético en el campo devanado

N = velocidad en RPM

En la fórmula anterior, vemos que el voltaje terminal V_t no es proporcional a la velocidad N a causa del término $I_a R_a$, ó caída de potencial en la armadura debida a su propia resistencia, que aunque es de valor pequeño (la resistencia $R = 1$ ohm), influye bastante.

La caída de potencial se hace más significativa a medida que crece la corriente de armadura y es debido a ello que la regulación decae, sobre todo para valores cercanos a la corriente de plena carga del motor.

REGULADOR DE VELOCIDAD.-

En la figura IV-11 tenemos la conexión para un regulador de velocidad. Esta configuración es muy parecida a la de regulador de voltaje, con la excepción de que el lazo mayor es una realimentación que proviene de un tacómetro que se encuentra acoplado a la flecha del motor. Si el tacómetro es de corriente directa, el rectificador de la figura se elimina, conectandose directamente el tacogenerador a las terminales C y D. La regulación en este arreglo es del 1 % aproximadamente, dependiendo en gran medida de la calidad del tacogenerador.

En este tipo de regulador se mejora bastante la regulación, ya que se está regulando una variable que es proporcional a la velocidad del motor, como lo es la FCEM (fuerza contraelectromotriz) que obtenemos mediante el tacogenerador.

$$FCEM = K\phi N$$

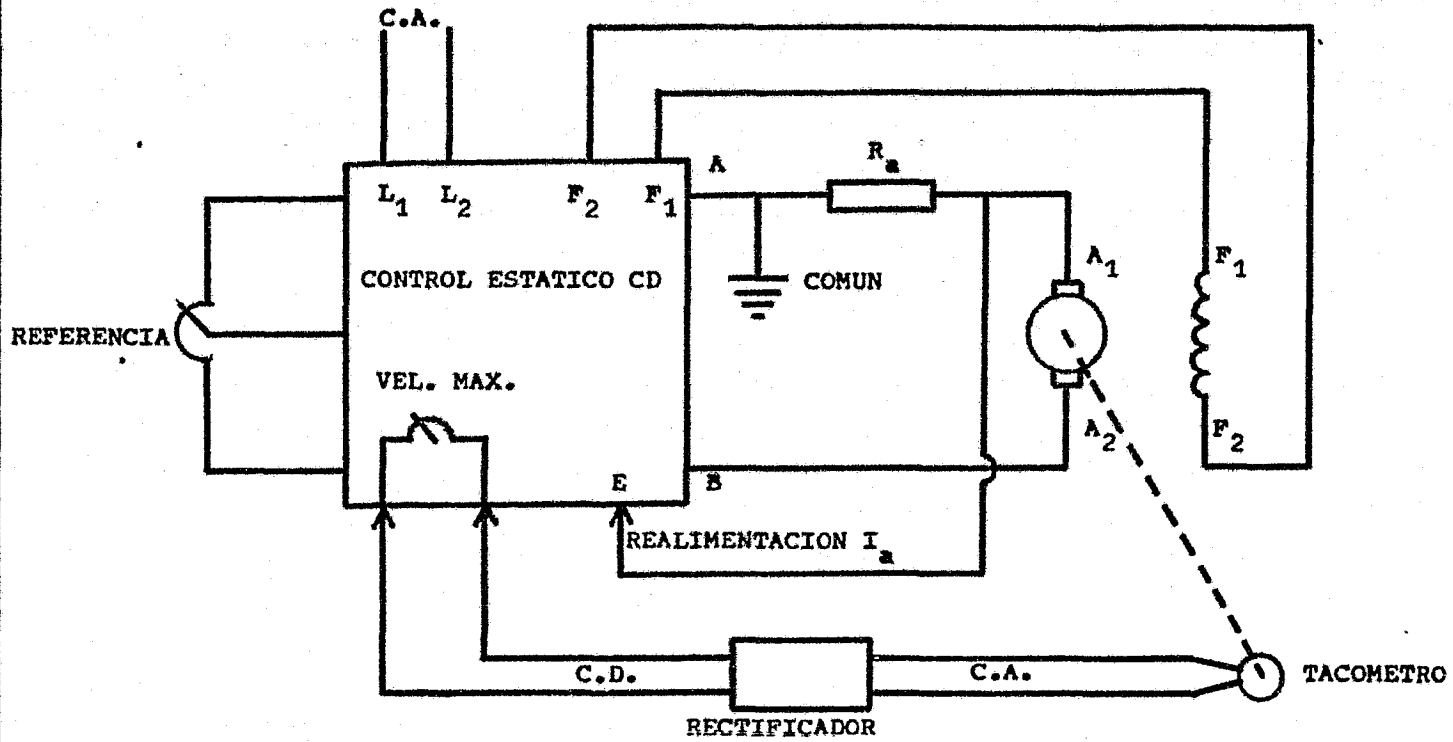


FIGURA IV - 11

REGULADOR DE CORRIENTE.-

En la figura IV-12 vemos la conexión para un regulador de corriente. Para este tipo de regulador se monitorea la corriente de armadura mediante un shunt y un transductor de corriente.

Lo que se está regulando realmente, es el par producido por el motor ya que como sabemos dicho par es directamente proporcional a la corriente de armadura según la fórmula ya conocida:

$$T = K \phi I_a \quad \text{donde;}$$

T = par o torque del motor

K = constante de construcción

ϕ = flujo total del entrehierro por polo

I_a = corriente de armadura

Para este tipo de regulador se debe tener una protección que impida que el voltaje de salida del control estático, se eleve demasiado en caso de que la carga mecánica del motor se desacople ó se rompa (caso muy frecuente en papeleras, huleras, etc.) ya que si la carga desaparece, la corriente del motor disminuye a un valor muy bajo, y debido a que el control está regulando corriente, tratará de restablecer el nivel de corriente establecida por el potenciómetro de referencia ó mando, aumentando el voltaje de salida del control estático hasta su valor máximo y por consiguiente aumentando la velocidad del motor hasta niveles que pueden dañarlo.

Cuando se regula velocidad ó voltaje se debe limitar la corriente y cuando se regula corriente se debe limitar el voltaje de tal manera que el producto de voltaje por corriente, no exceda la potencia mecánica del motor. De no hacerse así el motor puede dañarse.

REGULADOR DE POSICION.-

El regulador de posición es un poco más raro de encontrar en aplicaciones prácticas debido a su mayor costo y dificultad, pero como veremos enseguida, es un magnífico auxiliar en gran variedad de --

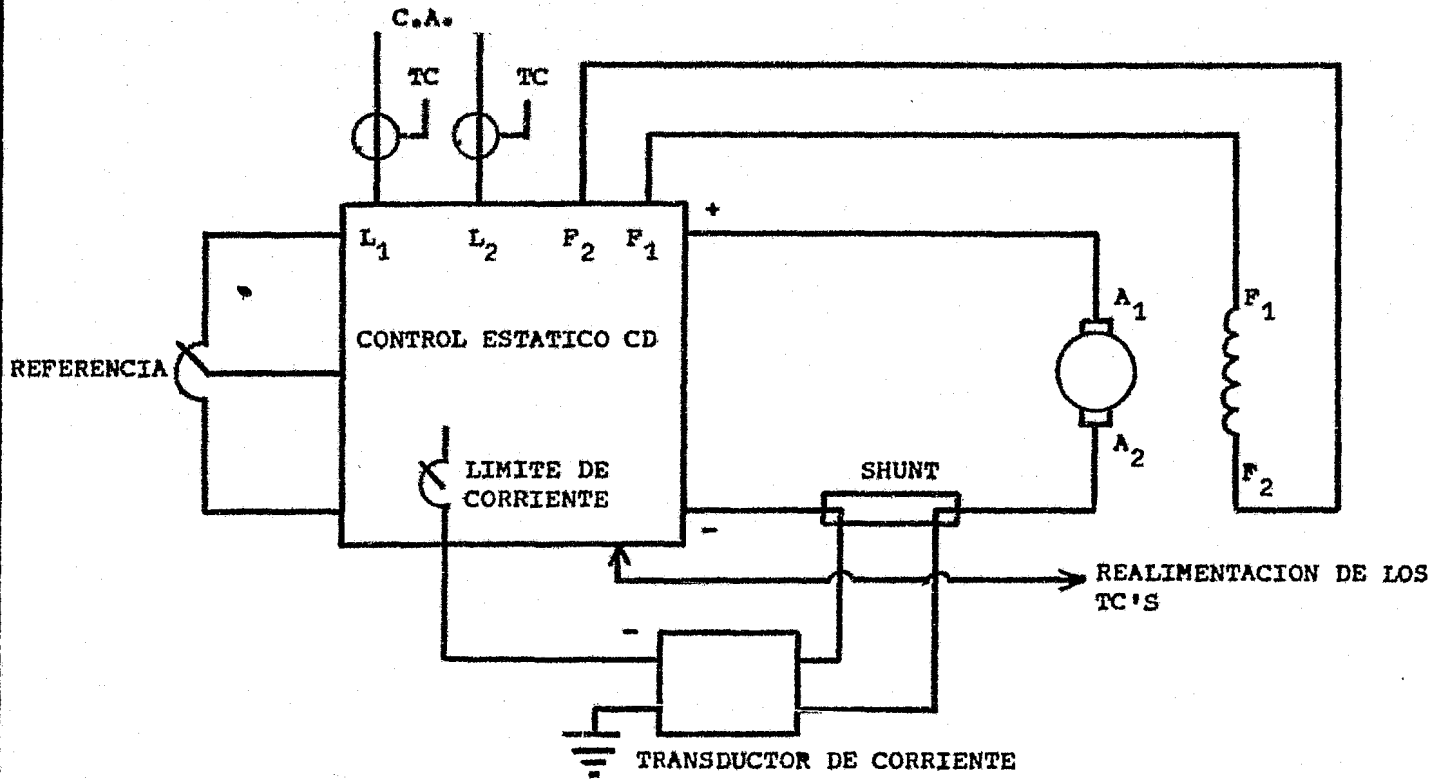


FIGURA IV - 12

de procesos.

veamos el arreglo mostrado en la figura IV-13 . En el lado izquierdo de la figura, tenemos un regulador de velocidad que mantiene la película ó tira del producto a una velocidad constante en la máquina, ésta película del producto forma un lazo más a la derecha, el cual se encuentra cargado mecánicamente por un rodillo danzante ó móvil, el rodillo puede estar cargado neumáticamente, hidráulicamente ó simplemente por su propio peso. Esto con el fin de dar tensión al producto que se está transportando en la máquina.

Conectado al eje vertical del rodillo danzante tenemos un dispositivo llamado reactor con núcleo móvil, que no es más que un transformador diferencial que genera un voltaje de corriente alterna -- proporcional a la posición vertical del rodillo móvil.

Esta función también puede realizarla un potenciómetro con su brazo móvil conectado mecánicamente al rodillo, pero es menos fiel a su movimiento que el reactor.

El voltaje de corriente alterna así generado se rectifica, y se toma como referencia ó comando para el control estático de C.D. -- número 2 . Previamente se compara con la señal de un potenciómetro marcado con la leyenda "posición", que nos indica cual debe ser la posición del rodillo danzante. Cuando ambas señales son iguales la señal de error se anula y el regulador queda satisfecho.

El control estático de C.D. no. 2 maneja al motor y éste a su vez a los dos rodillos que pellizcan la película para mantener la tensión.

Si se tiene exceso de tensión en el producto, el rodillo danzante se moverá hacia arriba, lo que producirá un voltaje de C.A. menor. Esto significa que la entrada positiva del regulador será menor y puesto que no se ha movido el potenciómetro de posición, cuya señal es negativa, producirá un voltaje de error predominantemente -- negativo que disminuirá la salida del control estático de C.D. -- no. 2 y por lo tanto la velocidad del motor, hasta que el rodillo danzante regrese a su posición original a causa de la disminución de la velocidad del producto transportado.

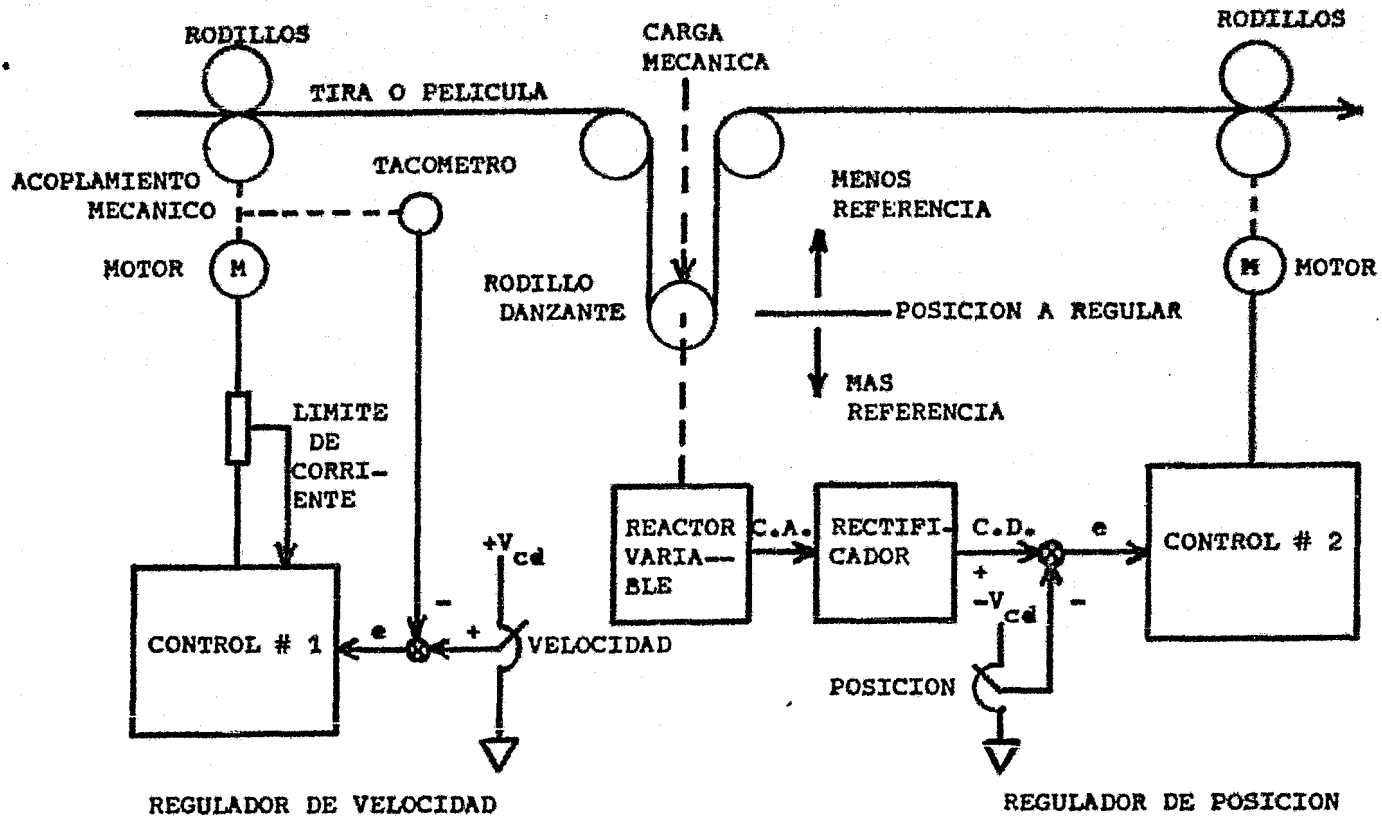


FIGURA IV - 13

Si por el contrario, disminuye la tensión del producto, el rodillo se moverá hacia abajo lo que producirá un mayor voltaje de referencia (positivo) y debido a ello aumentará la salida del control estático y por lo tanto la velocidad del motor, hasta que el rodillo suba a su posición deseada.

En los dos casos anteriores observamos que el regulador si está actuando como un regulador de posición.

Es necesario hacer notar que la posición del rodillo danzante es independiente de su carga, por lo que el regulador siempre reaccionará de tal manera que mantenga una posición constante en el rodillo móvil. Es así como se puede lograr un amplio rango de tensión usando este esquema, el cual es ampliamente usado en la industria textil, papelería, de metales, etc.

REGULADOR DE TENSION.-

En la figura IV-14 vemos el diagrama sencillo de una máquina de dos secciones. Consideremos primero el caso cuando los interruptores marcados "a" y "b" se encuentran abiertos.

A la izquierda de la figura tenemos un regulador de velocidad con un control estático de C.D. del tipo regenerativo, que significa su habilidad para motorizar y regenerar como lo vimos anteriormente. El regulador de velocidad mostrado en la figura tiene completo control de la tira del producto, en virtud de que los dos rodillos ejercen una fuerza en forma de prensa sobre el material.

A la derecha de la figura tenemos un regulador de tensión ó corriente con un potenciómetro de referencia marcado "tensión", cuya señal se compara con una retroalimentación de corriente y además con un límite de voltaje.

Sabemos que un regulador de corriente tiene la característica de que la velocidad es una variable independiente y puede tomar cualquier valor necesario para obtener la cantidad de corriente que está pidiendo el potenciómetro de tensión. Debido a ello, la velocidad del producto está dada por el regulador de velocidad que se

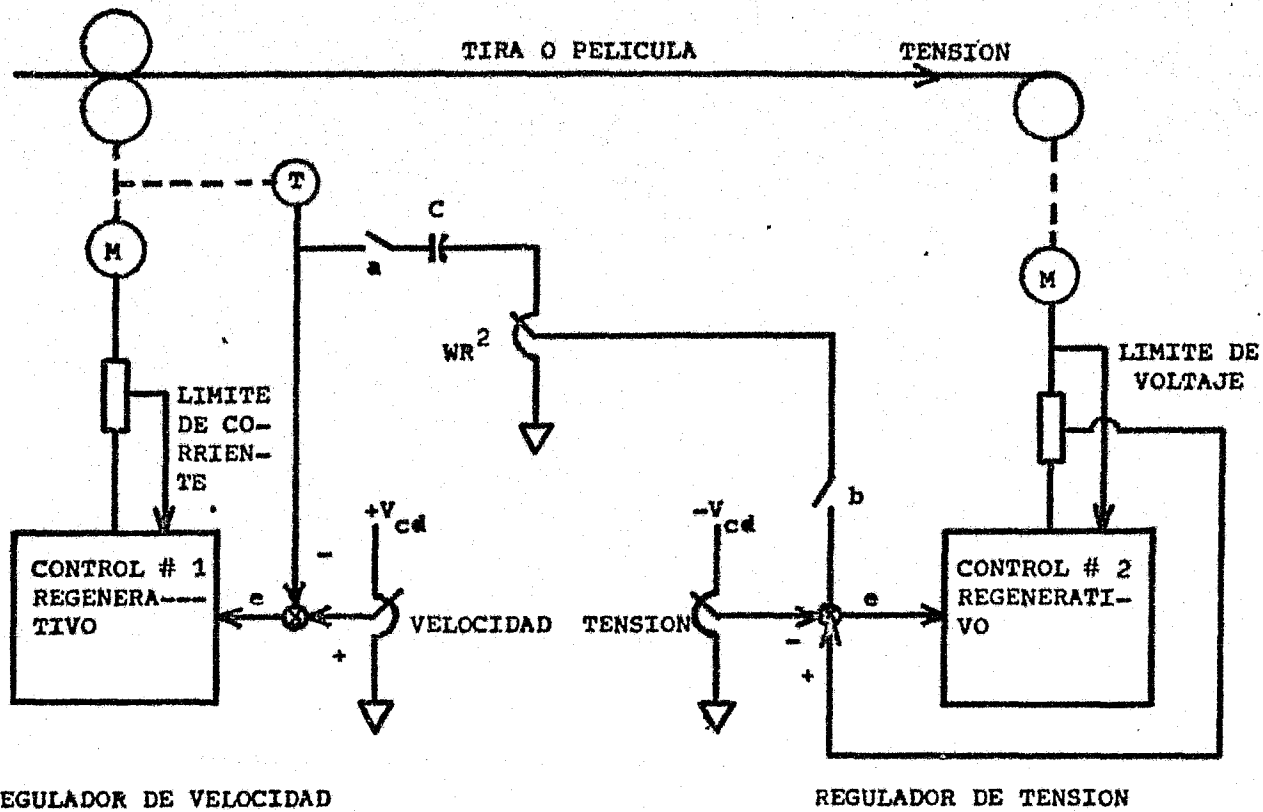


FIGURA IV - 14

encuentra a la izquierda de la figura IV-14.

Efecto de la inercia.-

Supongamos que el sistema anterior está operando a una velocidad de línea particular, cuyo valor exacto no es importante, nosotros queremos incrementar la velocidad ahora, por lo que giramos el potenciómetro de velocidad ó referencia, debido a lo anterior el regulador de velocidad aumentará su salida y por consiguiente su velocidad, momentáneamente este causará que la película ó tira del producto se afloje disminuyendo la tensión, lo que provocará una disminución en la realimentación de corriente en el regulador de tensión del lado derecho, y éste tratará de mantener la corriente de armadura constante, acelerará el motor hasta alcanzar la tensión deseada y la velocidad que tiene el regulador de la izquierda. Desde el punto de vista anterior, pareciera que el tiempo en que se pierde tensión en el producto fuera muy pequeño, pero este es inexacto ya que no se ha tomado en cuenta la inercia del rodillo bobinador y del producto mismo.

Puesto que el regulador de corriente no sabe cuanta inercia está presente en el rodillo, no hay manera de que la tensión permanezca constante cuando se incrementa la velocidad del producto, a menos que se use otro sistema mejor.

Un sistema adecuado para tal propósito se consigue cerrando los interruptores de la figura marcados como "a" y "b". veamos por qué.

Si la velocidad se cambia en el regulador de velocidad, el capacitor marcado "C" se debe cargar ó descargar, y al hacerlo desarrolla una señal a través del potenciómetro marcado " WR^2 " e de inercia. Esta señal es proporcional a la razón de cambio del voltaje de salida del tacómetro y por lo tanto a la velocidad del primer motor. Después se inyecta ésta señal como una referencia adicional en el regulador de corriente. Cuando el regulador de velocidad acelera, una señal proporcional a la inercia WR^2 del rodillo que maneja el regulador de corriente aparecerá en forma adicional en

la entrada de dicho regulador, esto hará que el motor reciba más corriente para mantener la tensión en el producto y para dar el par adicional requerido para acelerar el rodillo, de esta manera se evita que el producto pierda tensión.

Debido a que diferentes rodillos tienen diferentes inercias, el potenciómetro WR^2 puede ajustarse para satisfacer rodillos de diámetro diferente. Debe hacerse notar que la compensación por inercia, se utiliza solo en reguladores de corriente, y como regla general los reguladores de corriente hacen tensión contra un regulador de voltaje o de velocidad, ya que de no ser así la tensión del producto no se mantendrá.

REGULADOR DE TENSION EN UN BOBINADOR DE DIAMETRO VARIABLE.-

Para el caso en que un regulador de tensión maneje un rodillo cuyo diámetro es variable, se utiliza el mismo sistema anterior, con la adición de dos nuevos dispositivos como son; el rodillo cabalgador (que detecta el diámetro del rodillo bobinador al ir montado sobre él), y un regulador de corriente de campo. En la figura IV-15 tenemos este tipo de arreglo.

Como sabemos en un bobinador, el diámetro del rodillo se incrementa con la película o tira del producto y por consiguiente también se incrementa la inercia del rodillo WR^2 .

Para compensar este efecto se coloca un rodillo de diámetro pequeño en la parte superior del rodillo bobinador y al que llamaremos rodillo cabalgador. Este rodillo cabalgador está mecánicamente conectado al brazo móvil del potenciómetro para compensación de inercia marcado WR^2 . Cuando el rodillo bobinador aumenta su diámetro, la compensación de inercia aumentará debido al movimiento vertical del rodillo cabalgador, lo que nos da una señal adicional de inercia, proporcional al diámetro del rodillo bobinador.

Veamos ahora lo concerniente al regulador de corriente de campo del motor número 2 ; lo que nos interesa es mantener en el bobinador una tensión constante.

Cuando el rodillo bobinador aumenta su diámetro, la demanda de par

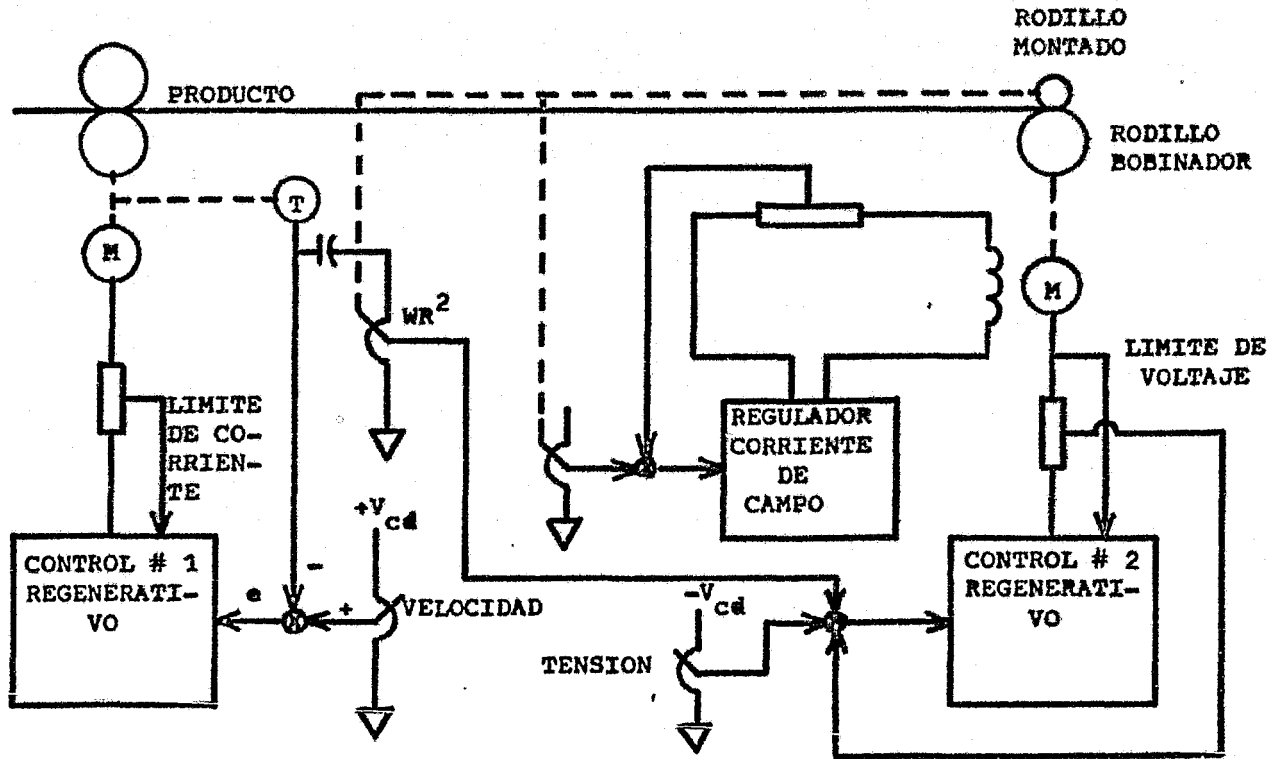


FIGURA IV - 15

ó torque del motor de C.D. también aumentará, más aún, puesto que la velocidad del producto se mantiene constante por el regulador de velocidad de la izquierda, el rodillo bobinador bajará su velocidad en RPM debido a su diámetro mayor y por consiguiente el motor no. 2 debe bajar su velocidad pero al mismo tiempo aumentar su par de salida. A este comportamiento se le conoce como el rango de potencia constante o más frecuentemente rango de campo debilitado, ya que aunque el par aumente, la velocidad del motor baja en la misma proporción manteniendo constante la potencia del motor:

$$\text{POTENCIA (HP)} = \frac{\text{PAR (Lb-ft)} \times \text{VELOCIDAD (RPM)}}{5250}$$

Inicialmente el motor estará a plena velocidad con el campo magnético debilitado al máximo valor seguro para el motor.

El regulador de la corriente de campo empezará con mínima referencia, esto significa que el campo tendrá corriente mínima y el motor correrá a velocidad máxima. Lo que podemos comprobar con la ecuación de velocidad para un motor de C.D.:

$$N = \frac{V_t - I_a R_a}{K\phi} \quad \text{donde } N = \text{velocidad en RPM}$$

ϕ = flujo magnético del campo

La ecuación anterior nos dice, que mientras menor sea el flujo magnético ϕ del campo devanado, mayor será la velocidad del motor. También está implícito el peligro de que se desboque el motor si se llega a perder dicho flujo magnético, ocasionando graves daños al motor.

Recordando ahora la ecuación del par que desarrolla un motor de C.D. :

$$T = K \phi' I_a \quad \text{donde; } T = \text{par, } I_a = \text{corriente de armadura, y } K = \text{constante de construcción.}$$

Como la corriente de armadura se mantiene constante, ya que tenemos un regulador de corriente (tensión), la única variable que puede cambiar en la ecuación es ϕ .

Cuando el diámetro del rodillo crece, el potenciómetro de referencia en el regulador de campo comenzará a incrementar su salida, lo que aumentará el flujo magnético del campo, esta acción producirá dos cosas:

- a).- incrementará el par, ya que la salida de par del motor depende ahora únicamente del flujo magnético.
- b).- disminuirá la velocidad del motor debido al aumento del flujo magnético.

Esta es una excelente aplicación del principio del rango de potencia constante.

CAPITULO V : EJEMPLO DE APLICACION PRACTICA

Supongamos que deseamos mover una película ó tira de algún producto, a una velocidad lineal de 720 ft/min, mediante un rodillo ó cilindro macizo de acero que tiene un diámetro de 1 ft y una longitud de 10 ft.

Tomaremos el peso específico del acero como 487 Lbs/ft³.

Para calcular la potencia del motor de C.D., necesitamos conocer la velocidad del rodillo en RPM'S así como su inercia en Lb/ft², la velocidad en RPM'S será:

$$N = \frac{V}{\pi D} = \frac{720}{\pi(1)} = 229.2 \text{ RPM, donde } V = \text{ft/min, } D = \text{ft}$$

$$N = 230 \text{ RPM aproximadamente.}$$

Para calcular la inercia del rodillo necesitamos conocer su peso y su radio de giro, el volumen del cilindro será:

$$\text{Vol.} = \frac{\pi D^2}{4} \times L, \text{ donde } D = \text{ft, } L = \text{longitud (ft)}$$

$$\text{Vol.} = \frac{\pi(1)^2}{4} \times 10 = 7.854 \text{ ft}^3$$

ahora encontraremos el peso W del cilindro en libras.

$$W = 487 \frac{\text{Lbs}}{\text{ft}^3} (7.854 \text{ ft}^3) = 3,824.9 \text{ Lbs.}$$

El radio de giro K de un cilindro sólido es el siguiente:

$$K^2 = \frac{r^2}{2} \quad \text{donde; } r = \text{radio del cilindro en ft}$$

Por lo tanto la inercia será:

$$WK^2 = 3824.9 \text{ (Lbs)} \times \frac{(1/2)^2}{2} \text{ (ft}^2\text{)}$$

$$\underline{WK^2 = 478.1 \text{ Lb-ft}^2}$$

En páginas siguientes, podemos obtener el radio de giro y la inercia para diferentes formas de cuerpos, y una tabla que nos da directamente la inercia por pulgada de longitud, para cilindros sólidos de acero con diferentes diámetros en pulgadas.

Esta última tabla es muy cómoda ya que nos ahorra mucho tiempo al hacer los cálculos de la inercia de un cilindro por pasos, como lo hicimos anteriormente.

Comprobaremos el resultado obtenido antes, con el de esta tabla.

En la columna de diámetro en pulgadas, buscamos el número 12, ya que como sabemos 1 ft tiene 12 pulgadas (in) y encontramos el número 3.991 en la columna de WK^2 . Lo único que tenemos que hacer es multiplicar este número por la longitud del cilindro en pulgadas y tendremos:

$$3.991 \frac{\text{Lb-ft}^2}{\text{in}} \times 120 \text{ in} = 478.9 \text{ Lb-ft}^2$$

$$\text{ya que } 10 \text{ ft} = 120 \text{ in}$$

Este resultado ya lo habíamos calculado pero con mayor dificultad anteriormente.

Si queremos acelerar el rodillo hasta su velocidad nominal (230 RPM) en 2 segundos, podemos calcular el par necesario para hacerlo con la fórmula que ya conocemos:

$$T = \frac{WK^2 N}{308 t} = \frac{478.9 (230)}{308 (2)} = 178.8 \text{ Lb-ft}$$

La potencia que deberá manejar el motor, suponiendo cero -----
pérdidas sería:

$$HP = \frac{T N}{5250} = \frac{178.8 (230)}{5250} = 7.83$$

En la práctica los motores de C.D. no se fabrican para todos los -
tipos de velocidades por motivos económicos, por lo que es necesari-
o el uso de reductores de velocidad, para acoplar las necesida--
des de la carga con las capacidades del motor.

Tomaremos un motor cuya velocidad base es de 1750 RPM, por lo que
la relación de velocidades del reductor deberá ser $1750/230 = 7.6$
En páginas siguientes tenemos una tabla con diferentes tipos de --
reductores de donde seleccionaremos un reductor adecuado para ----
nuestras necesidades.

vemos en dicha tabla que unicamente el reductor D28 satisface ----
nuestras necesidades ya que su relación es de 7.6:1 y su capacidad
mecánica es de 18.8 HP aproximadamente.

El reductor D21 no cumpliría ya que su capacidad es unicamente de
6.52 HP y necesitamos aproximadamente 10 HP en el rodillo.

Hasta ahora lo que hemos calculado es:

- 1.- RPM'S del rodillo = 230
- 2.- inercia del rodillo $WK^2 = 478.9 \text{ Lb-ft}^2$
- 3.- par necesario para acelerar el rodillo desde el reposo
hasta 230 RPM en dos (2) segundos
 $T = 178.8 \text{ Lb-ft}$
- 4.- potencia necesaria en el rodillo $P = 7.83 \text{ HP}$

La eficiencia del reductor la podemos obtener como sigue:

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{HP \text{ salida}}{HP \text{ entrada}} \times 100$$

Del reductor D28 podemos obtener estos datos de la misma tabla:

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{18.8}{19.6} \times 100 = 95.9 \%$$

Ya con la eficiencia del reductor, podemos calcular la potencia -- de entrada al reductor o potencia del motor como sigue:

$$\text{HP motor} = \frac{\text{HP carga}}{\text{eficiencia}} = \frac{7.83}{0.959} = 8.165$$

Para comprobar si un motor de 10 HP, 1750 RPM, puede con el par -- reflejado de la carga mediante el reductor, buscaremos la inercia equivalente reflejada en la flecha del motor.

$$WK_{eq}^2 = WK_p^2 \left(\frac{N_p}{N_m} \right)^2$$

$$WK_{eq}^2 = 478.9 (230/1750)^2 = 8.27 \text{ Lb-ft}^2$$

Por lo tanto el par necesario en la flecha del motor para llegar a la velocidad base en 2 segundos será:

$$T = \frac{WK_{eq}^2 N}{308 t} = \frac{8.27(1750)}{308(2)} = 23.49 \text{ Lb-ft}$$

este resultado se confirma al recordar que un reductor de veloci-- dad, es también al mismo tiempo un multiplicador ó reductor de --- par. multiplicando ahora por la relación del reductor, el valor en-- contrado tenemos:

$$23.49 \times 7.6 = 178.5 \text{ Lb-ft}$$

Que es el par que ya habíamos obtenido para la carga.

El par disponible del motor en cuestión lo obtenemos a partir de sus datos de placa que son:

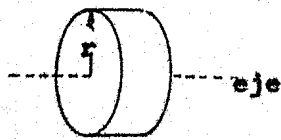
$$P = 10 \text{ HP, } N = 1750 \text{ RPM}$$

y obteniendo el par en la flecha del motor:

$$T_m = \frac{HP_m (5250)}{N_m} = \frac{10(5250)}{1750} = 30 \text{ Lb-ft}$$

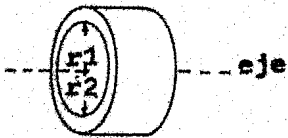
que es suficiente para manejar el par reflejado de la carga que -- son 23.49 Lb-ft, más las pérdidas por fricción en el reductor, redillo, motor, etc.

RADIO DE GIRO DE DIFERENTES CUERPOS EN ROTACION



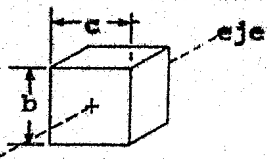
CILINDRO SOLIDO
alrededor de su
propio eje

$$K^2 = r^2/2$$



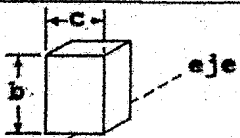
CILINDRO HUECO
alrededor de su
propio eje

$$K^2 = \frac{r_1^2 + r_2^2}{2}$$



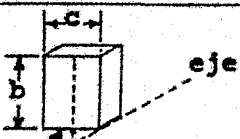
PRISMA RECTANGULAR
alrededor de un eje
en su centro

$$K^2 = \frac{b^2 + c^2}{12}$$



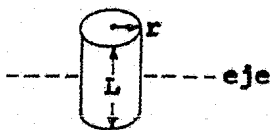
PRISMA RECTANGULAR
alrededor de un eje
como se ve en la --
figura

$$K^2 = 4b^2 + c^2$$



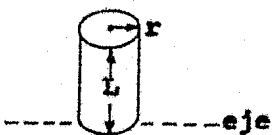
PRISMA RECTANGULAR
alrededor de un eje
en una arista

$$K^2 = \frac{4b^2 + c^2 + 12bd + 12d^2}{12}$$



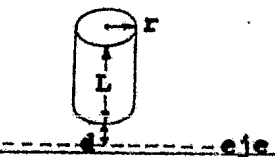
CILINDRO
alrededor de un eje
como se ve en la --
figura

$$K^2 = \frac{L + 3r^2}{12}$$



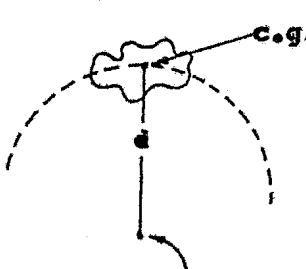
CILINDRO
alrededor de un eje
como se ve en la --
figura

$$K^2 = \frac{4L^2 + 3r^2}{12}$$



CILINDRO
alrededor de un eje
exterior

$$K^2 = \frac{4L^2 + 3r^2 + 12dL + 12d^2}{12}$$



C.g. (centro de gravedad) $K_T^2 = K_G^2 + d^2$ donde;

K_G = radio de giro alrededor del eje que
pasa por el centro de gravedad

K_T = radio de giro alrededor de cualquier
eje paralelo

d = distancia entre el centro de gravedad
y el eje de rotación.

INERCIA (WK²) DE CILINDROS SOLIDOS DE ACERO

DIAM	WK ²	DIAM	WK ²	DIAM	WK ²	DIAM	WK ²	DIAM	WK ²
1	0.000192	41	543.9	81	8286	121	41262	161	12933
2	.00308	42	598.8	82	8703	122	42643	162	13257
3	.01559	43	658.1	83	9135	123	44059	163	13588
4	.049278	44	721.4	84	9584	124	45510	164	13924
5	.12030	45	789.3	85	10048	125	46995	165	14267
6	.2494	46	861.8	86	10529	126	48517	166	14616
7	.46217	47	939.3	87	11028	127	50076	167	14972
8	.78814	48	1021.8	88	11544	128	51672	168	15333
9	1.262	49	1109.6	89	12077	129	53305	169	15702
10	1.924	50	1203.07	90	12629	130	54978	170	16077
11	2.818	51	1302.2	91	13200	131	56689	171	16458
12	3.991	52	1407.4	92	13790	132	58440	172	16847
13	5.497	53	1518.8	93	14399	133	60231	173	17242
14	7.395	54	1636.7	94	15029	134	62063	174	17644
15	9.745	55	1761.4	95	15679	135	63936	175	18053
16	12.61	56	1893.1	96	16349	136	65852	176	18469
17	16.07	57	2031.9	97	17041	137	67811	177	18893
18	20.21	58	2178.3	98	17755	138	69812	178	19323
19	25.08	59	2332.5	99	18490	139	71858	179	
20	30.79	60	2494.7	100	19249	140	73948	180	20207
21	37.43	61	2665.2	101	20031	141	76083	181	20659
22	45.09	62	2844.3	102	20836	142	78265	182	21120
23	53.87	63	3032.3	103	21665	143	80493	183	21588
24	63.86	64	3229.5	104	22519	144	82768	184	22064
25	75.19	65	3436.1	105	23397	145	85091	185	22547
26	87.96	66	3652.5	106	24302	146	87463	186	23039
27	102.30	67	3879.0	107	25232	147	89884	187	23538
28	118.31	68	4115.7	108	26188	148	92355	188	24046
29	136.14	69	4363.2	109	27173	149	94876	189	24561
30	155.92	70	4621.7	110	28183	150	97449	190	25085
31	177.77	71	4891.5	111	29222	151	100075	191	25618
32	201.8	72	5172	112	30289	152	102750	192	26158
33	228.2	73	5466	113	31385	153	105482	193	26708
34	257.2	74	5772	114	32511	154	108268	194	27266
35	288.8	75	6090	115	33667	155	111107	195	27832
36	323.2	76	6422	116	34853	156	114002	196	28407
37	360.7	77	6767	117	36071	157	116954	197	28992
38	401.3	78	7125	118	37320	158	119962	198	29585
39	445.3	79	7498	119	38601	159	123028	199	30187
40	492.78	80	7885	120	39914	160	126152	200	30798

WK² en Lb-ft²

Basado en acero de 487 Lb per pie cubico

Diametro en pulgadas

REDUCTORES DE VELOCIDAD PARALELOS

X	REDUCCION SIMPLE			REDUCCION DOBLE					REDUCCION TRIPLE			
	S18	S21	S28	D18	D21	D28	D38	D50	T18	T21	T28	
2.25 778 rpm	378	688	1570									
	467	850	184									
	477	865	198									
2.75 638 rpm	361	683	1685									
	384	690	1700									
	372	705	1730									
3.37 618 rpm	381	625	1565									
	289	523	128									
	285	533	133									
4.13 424 rpm	324	800	1815					6270	11000			
	218	402	1020					426	764			
	223	410	1040					446	795			
5.08 348 rpm	281	583	1400		1662	4051	6940	12800				
	154	320	767		907	225	378	700				
	157	328	783		940	235	392	728				
6.2 282 rpm	357	625	1200		1370	4431	7300	13800				
	115	275	539		808	198	336	631				
	117	280	560		840	208	350	658				
7.6 220 rpm					790	1790	3150	6150	13400			
					288	652	188	2486	5021			
					300	670	196	2590	5230			
9.3 186 rpm					878	1930	3610	6420	16300			
					258	675	168	218	481			
					260	600	175	2590	500			
11.4 154 rpm					965	2045	3880	7310	17100			
					211	600	1840	1824	430			
					220	520	1700	1300	448			
14.0 128 rpm					972	2180	4050	8790	19301			
					183	432	1200	1742	281			
					198	450	1250	1828	400			
17.1 102 rpm					1010	2410	4650	10300	19800			
					183	375	915	1699	2706			
					178	390	954	1770	3340			
20.9 87 rpm					1015	2510	5200	11400	22100			
					135	337	730	1408	2880			
					140	320	760	1550	3000			
25.8 68.8 rpm					1018	2400	5210	11400		17391		
					119	260	675	1228		194		
					118	270	707	1280		208		
31.4 56.7 rpm					1140	2500	5600				18022	
					101	221	600				170	
					105	230	620				180	
38.5 45.8 rpm										2820	6300	21000
										704	491	152
										717	490	152
47.1 37.2 rpm										980	328	5400
										2810	6560	22700
										154	386	124
57.7 30.3 rpm										164	400	142
										1120	2570	6950
										2500	7240	22800
70.6 24.8 rpm										120	348	110
										128	370	112
										1200	3650	6100
88.6 20.2 rpm										7650	7690	27800
										104	301	822
										111	320	864
106.9 16.5 rpm										1310	3800	6600
										2590	8200	20000
										81	264	610
129.7 13.8 rpm										88	270	700
										1420	4100	7300
										2640	8200	20000
										89	276	620
										71	273	640
										1520	4490	7700

M.- Relación nominal y rpm's de salida.

En el primer renglón se indica el par de salida en lb-in

En el segundo renglón se indican los HP de salida

En el tercer renglón se indican los HP de entrada

En el cuarto renglón se indica la carga máxima en lbs. de la flecha de salida.

Se toma como velocidad de entrada 1750 RPM'S

BIBLIOGRAFIA

ELECTRONIC CIRCUITS: DISCRETE AND INTEGRATED
..... Schilling and belove,- McGRAW-HILL

BASIC ELECTRONICS .. BERNARD GROB, McGRAW-Hill

OPERATIONAL AMPLIFIERS.....
..... Tobey,- McGRAW-HILL

PROBLEMS WITH INDUSTRIAL DRIVE REGULATORS.....
..... PAPER H-7011-1 Davison-Virant,- ..
RELIANCE ELECTRIC CO.

D.C. MACHINERY TM-1033-2,- RELIANCE ELECTRIC CO.

SELECCION AND OPERATION OF MAX PAK DRIVES.....
..... RELIANCE ELECTRIC AND. CO.