

# MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

En esta situación, la energía producida por el motor que funciona como generador es transformada en calor por efecto Joule en las resistencias de carga conectadas al inducido del motor. En la figura 13 (a) se muestra el esquema eléctrico correspondiente para un motor de excitación independiente.

Cuando el conmutador S de la Figura 13 (a) está situado en la posición 1, el inducido se alimenta de la red de c.c. y la máquina funciona en régimen motor absorbiendo una corriente  $I_i$  de la red en el sentido señalado. Al pasar el conmutador S a la posición 2 se carga el inducido sobre una resistencia externa  $R_{ext}$ , lo que provocará una inversión en el sentido de la corriente. Si se considera que en el momento de la conmutación la f.c.e.m. del motor es igual a  $E$ , el valor de la corriente  $I_i$  es:

$$I_i = -\frac{E}{R_i + R_{ext}} = -\frac{K_E \cdot \Phi \cdot n}{R_i + R_{ext}} \quad (18) \text{ Es decir tiene un valor negativo y por consiguiente el par de}$$

frenado desarrollado por la máquina es negativo y de valor:  $\tau = K_\tau \cdot \Phi \cdot I_i = \frac{K_\tau \cdot K_E \cdot \Phi^2 \cdot n}{R_i + R_{ext}} \quad (19)$  esto

es, el par de frenado es proporcional a la velocidad e inversamente proporcional a la resistencia total del circuito del inducido  $R_i + R_{ext}$ . De la ecuación anterior se obtiene el valor de la velocidad  $n$ :

$$n = -\frac{\tau(R_i + R_{ext})}{K_\tau} \cdot K_E \cdot \Phi^2 \quad (20)$$

En este caso de frenado reostático o dinámico, las características par-velocidad para diversas resistencias de carga externas son las mostradas en la Figura 13 (b), que son rectas que pasan por el origen de coordenadas y que tienen lugar en el 2º cuadrante. Suponga que la máquina está trabajando como motor en el punto de trabajo A. En el momento de conectar el inducido sobre la resistencia externa  $R_{ext}$  comienza el régimen de frenado dinámico o por disipación de energía, y como debido a la inercia del rotor, la velocidad no puede cambiar instantáneamente, no habrá variación en la f.c.e.m. del motor y el punto de

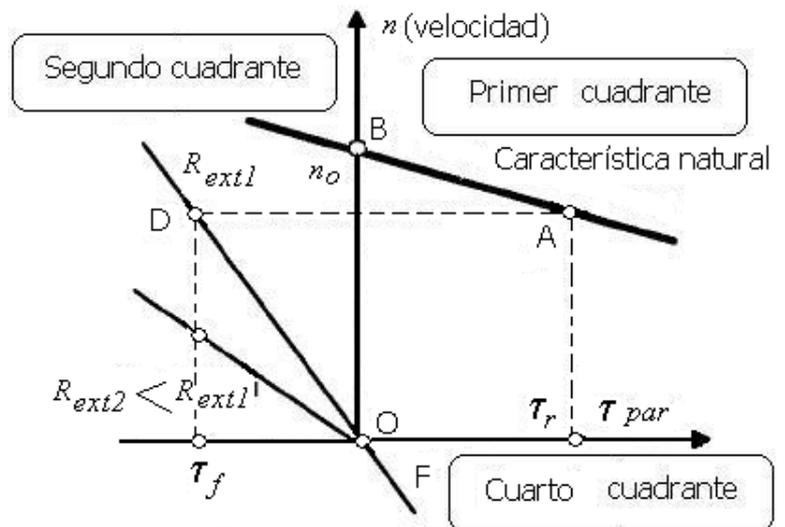


Figura 13 (b)-Frenado reostático de un motor de c.c. excitación independiente

funcionamiento se traslada a D, en el que se tiene un par de frenado  $\tau_f$ . A partir de este momento la velocidad de rotación se va reduciendo siguiendo la recta DO, hasta llegar a pararse en el punto O. En este momento debe desconectarse el motor de la red y aplicar el freno mecánico, a fin de detenerlo totalmente (inmovilizándolo), ya que en caso contrario la máquina puede comenzar a girar en sentido contrario siguiendo el tramo OF de la recta en el cuarto cuadrante.

Para conseguir el frenado dinámico de un motor serie hay que tener en cuenta que si se conserva el mismo sentido de rotación y las mismas conexiones entre el inductor y el inducido, la máquina en régimen generador es imposible de cebar, ya que la corriente inductora tiende a anular el magnetismo remanente de los polos. Una máquina serie solo se puede cebar como generador si su sentido de rotación es opuesto al que tenía como motor. Si se desea cebar con el mismo sentido de rotación que tenía funcionando como motor, es necesario invertir las conexiones entre el inductor y el inducido, tal como se señala en la Figura 14, para conservar de este modo el sentido de la corriente inductora (pese a la inversión de la corriente en el inducido) En algunos casos el frenado dinámico se realiza separando los circuitos inductor e inducido y funcionando el conjunto como una máquina con excitación independiente, de un modo análogo al señalado anteriormente.

# MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

## c) Frenado a contracorriente

Este procedimiento de frenado se emplea cuando es necesario parar repentinamente un motor para luego poder invertir su marcha, como en ciertas aplicaciones de trenes de laminación de acerías y grúas de puerto. Sin alterar las conexiones del inductor, se aplica tensión al inducido en sentido inverso, lo que ocasiona un frenado brusco, el motor se para e inicia la marcha en sentido inverso. En algunos casos se abre el interruptor principal en el instante en que el rotor pasa a la situación de reposo, o sea, justamente antes de que el motor comience a girar en sentido contrario.

En la figura 14 (a) se muestra el esquema eléctrico de frenado a contracorriente o contramarcha de un motor con excitación independiente. Inicialmente el conmutador S está en la posición 1 y la máquina funciona como motor absorbiendo el inducido una corriente  $I_i$  en el sentido mostrado en la Figura 14 (a). Si la resistencia limitadora de la corriente del inducido es  $R_r = 0$  el valor de la corriente

anterior es:  $I_i = \frac{U - E}{R_i}$  lo

que da lugar a la curva par-velocidad expresada en (7), y que para un par resistente  $\tau$ , corresponde al punto de funcionamiento A de la característica mecánica natural de la Figura 14 (b).

Cuando el conmutador S pasa a la posición 2, se invierte la polaridad de la tensión aplicada al motor, y como en los primeros instantes, el motor continuará girando en el mismo sentido que llevaba previamente, la f.c.e.m. del motor  $E$

permanecerá invariable y se producirá una corriente de sentido contrario al señalado en la Figura 14

(a), cuyo valor es:  $I = -\frac{U + E}{R_i + R_r}$  (21) donde

$R_r$  es una resistencia que se coloca en serie con el inducido para limitar la fuerte corriente producida en el período de frenado y que en la práctica suele emplearse doble o triple que la utilizada para limitar la corriente de arranque en régimen motor. La característica par-velocidad en este período de frenado viene definida por:

$$\tau = K_\tau \cdot \Phi \cdot I_i = -K_\tau \cdot \Phi \cdot \frac{U + E}{R_i + R_r} \quad (22)$$

$$\Rightarrow n = -\frac{U}{K_E \cdot \Phi} - \frac{R_i + R_r}{K_\tau \cdot K_E \cdot \Phi^2} \cdot \tau \quad (23)$$

Que corresponde a la recta DFG que transcurre por el segundo y tercer cuadrante de las características mecánicas de la Figura 14 (b),

en la que se observa que para  $\tau = 0$  se tiene:

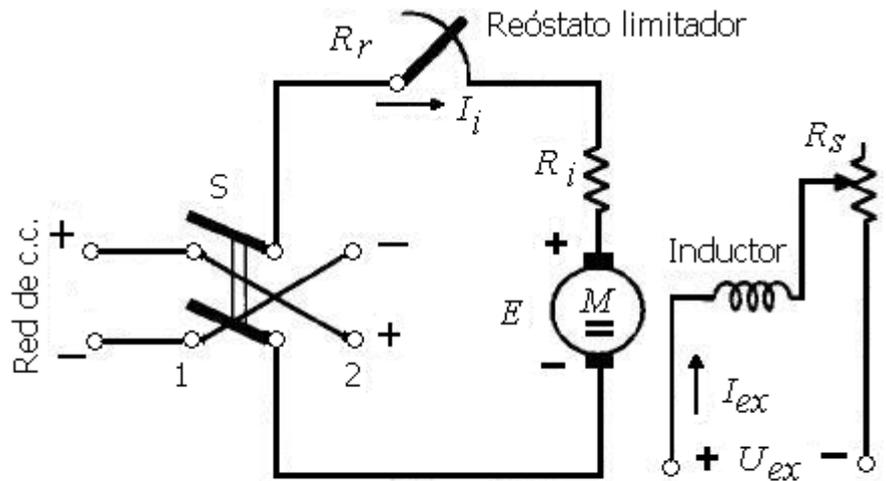


Figura 14 (a) Inversión de marcha motor excitación independiente

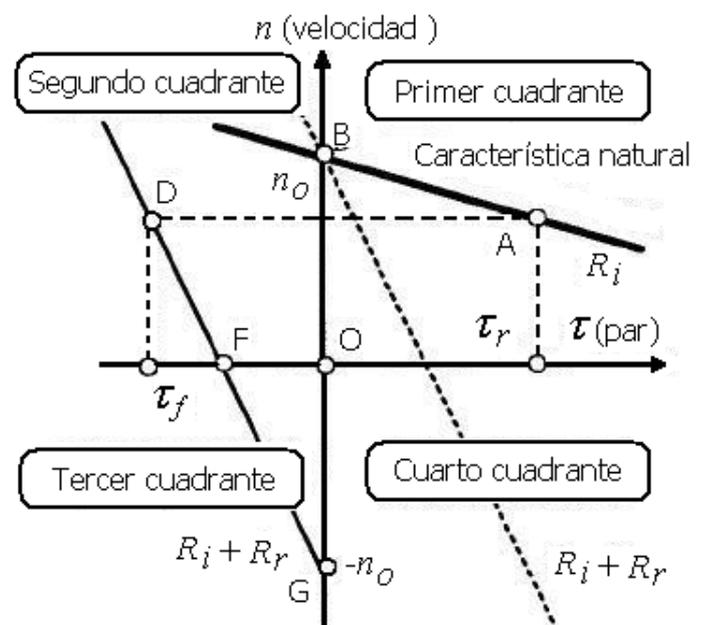


Figura 14 (b) Curvas par-velocidad

# MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

$$n = -\frac{u}{K_E \cdot \Phi} = n_0$$

Si se supone que la máquina está trabajando inicialmente como motor en el punto A de la *característica mecánica natural*, al producirse la conmutación, además de cambiar la polaridad de la tensión aplicada a la máquina se introduce la resistencia limitadora  $R_r$  en el circuito del inducido, y la máquina pasará a trabajar en el punto D del segundo cuadrante, ejerciendo un par de frenado  $\tau_f$ .

Este par de frenado provoca una deceleración del rotor y la velocidad de la máquina se va reduciendo siguiendo la recta DF. Al pasar el motor por el punto F (velocidad cero) se desconecta el motor de la red. En caso de que no se realice esta operación, la máquina se irá acelerando en sentido contrario. Un proceso análogo al anterior se emplea para frenar el motor serie.

De cualquier manera, el frenado a contracorriente es un método de muy bajo rendimiento debido a la gran cantidad de energía disipada en las resistencias colocadas en serie con el inducido.-

## Funcionamiento de una máquina de c.c. en cuatro cuadrantes

Como se ha comprobado en los párrafos anteriores, el motor de corriente continua es una máquina eléctrica muy versátil que permite una excelente regulación de velocidad y que puede funcionar con ambos sentidos de giro, produciendo pares electromagnéticos a favor o en contra del sentido de rotación, y es por ello que ha sido la máquina motriz por excelencia en aplicaciones de velocidad variable, conocidas modernamente como accionamientos eléctricos: tracción eléctrica, trenes de laminación, maquinaria de elevación y transporte y otros.

Para describir los modos de funcionamiento de una máquina de c.c. se utiliza la representación en cuatro cuadrantes mostrada en la figura 15. En el eje de abscisas se representa el par electromagnético que genera la máquina y que también sirve para representar la corriente que atraviesa el inducido, al ser proporcional el par a la corriente. En el eje de ordenadas se representa la velocidad de giro, en rad/s o en rpm; si se supone el flujo inductor constante, la f.c.e.m. del motor es proporcional a la velocidad, por lo que también el eje de ordenadas puede servir para representar la f.c.e.m. del motor, y si se tiene en cuenta que, debido a la pequeña caída de tensión en el inducido,  $E \approx U$ , el eje de ordenadas representa también el eje de tensiones. Es decir, hay proporcionalidad de las características mecánicas  $n = f_1(\tau)$  con  $U = f_2(I_i)$

De acuerdo con lo anterior, en la Figura 15 se ha señalado el eje de abscisas con las magnitudes  $\tau$  e  $I_i$  y el eje de ordenadas con  $n$  y  $U$ . Estas magnitudes se toman como positiva en el primer cuadrante, que corresponde al funcionamiento como motor girando en sentido directo o positivo (antihorario). La potencia mecánica desarrollada por el motor es el producto del par por la velocidad angular de giro, de tal modo que, si estas dos magnitudes son positivas, su producto será positivo, indicando con ello que la *potencia mecánica es positiva cuando sale energía mecánica por el eje*. De un modo análogo, si  $U$  e  $I_i$ , son positivos, será también positivo su producto, lo que indica que la *potencia eléctrica es positiva cuando la máquina absorbe energía eléctrica de la red*. Para facilitar el estudio se ha incluido en cada cuadrante de la Figura 15 el circuito del inducido con los sentidos de la corriente y las polaridades tanto de la f.c.e.m. del motor como de la tensión aplicada a la máquina.

En el cuadrante 1, la velocidad y el par son positivos, y por consiguiente, son positivas tanto la tensión como la corriente del inducido. De este modo es positiva la potencia eléctrica que absorbe la máquina y también la potencia mecánica que sale del eje del motor. Se produce una transformación de energía eléctrica en energía mecánica. Cuando la máquina trabaja en el cuadrante 2, la velocidad es positiva (giro directo) y por ello son también positivas tanto la tensión aplicada como f.c.e.m. del motor; el par electromagnético y la corriente de inducido son negativos. En consecuencia, la máquina absorbe potencia mecánica en el eje (valor negativo) y se devuelve energía eléctrica a la red (valor negativo). Se ha producido un cambio en el sentido del flujo de energía en la máquina, que ahora funciona como generador en régimen de frenado regenerativo o

# MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

por recuperación, aunque también esta energía eléctrica puede disiparse en una resistencia externa como sucede en el frenado reostático o dinámico.

En el cuadrante 3, tanto el par como la velocidad son negativos, por lo que son negativas la tensión aplicada y la corriente absorbida. De este modo tanto la potencia mecánica como la potencia eléctrica son magnitudes positivas. La máquina trabaja como motor girando en sentido inverso. Es evidente que para que se invierta el sentido de la corriente se debe cumplir que  $|U| > |E|$ , y de

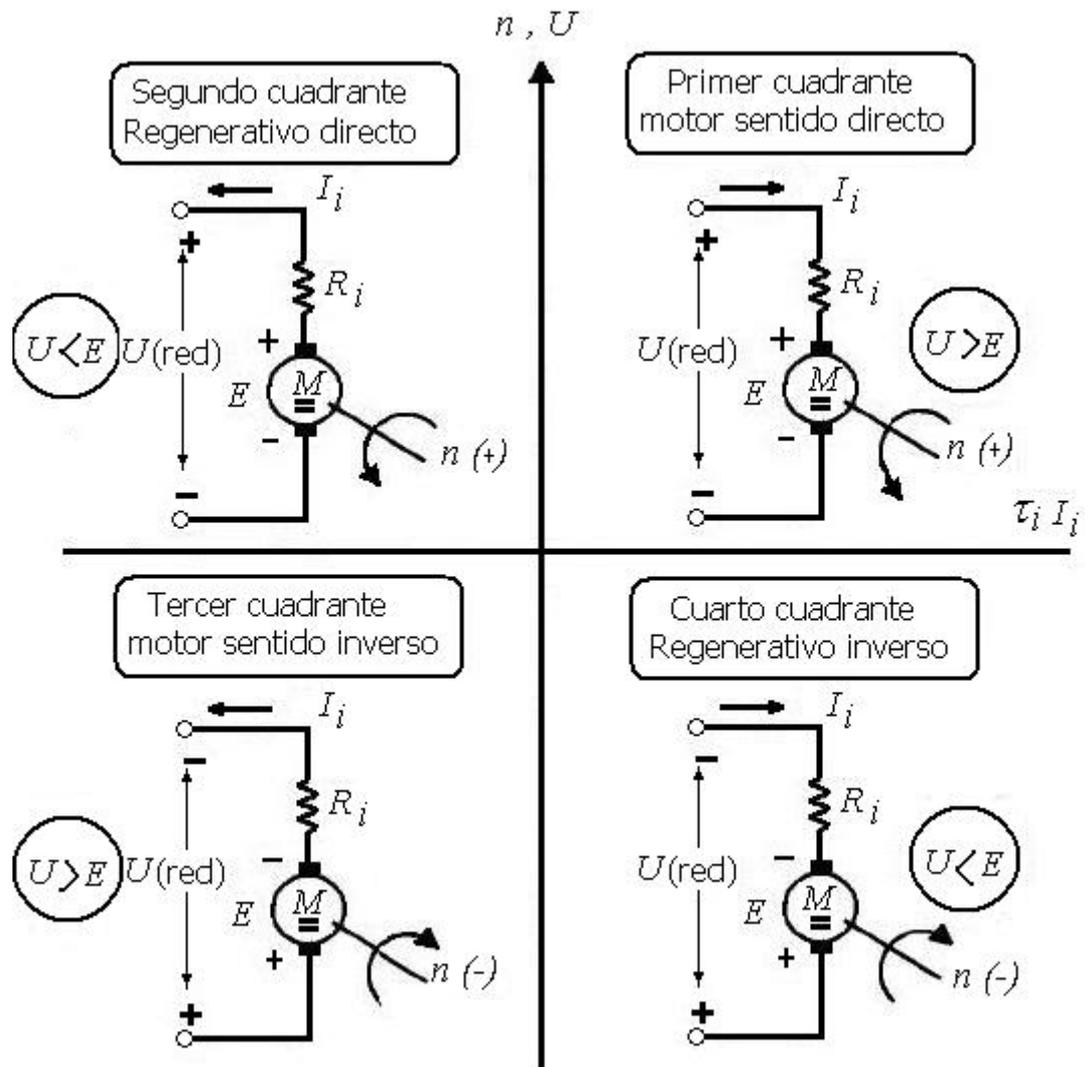


Figura 15 Funcionamiento de la maq. de c.c. en cuatro cuadrantes

este modo el flujo energético se dirige de la red al motor. Cuando la máquina trabaja en el cuadrante 4, el par es positivo y la velocidad negativa, por lo que la potencia mecánica es negativa y procede del mecanismo accionado por el motor. La f.c.e.m. es negativa y la corriente del inducido es positiva, lo que se verifica si  $|E| > |U|$ , y se devuelve energía eléctrica a la red. La máquina funciona en régimen generador como freno regenerativo en sentido inverso, aunque también se puede frenar la maquina disipando la energía eléctrica sobre resistencias externas. En la tabla siguiente Figura 16 se resumen los conceptos anteriores, señalando los signos correspondientes de las diversas magnitudes implicadas, tanto eléctricas como mecánicas.-

Funcionamiento	Cuadrante	Velocidad $n, w$	Par $\tau$	Tensión $U$	Corriente $I_i$	Potencia mecánica $P_{mec} = \tau \cdot w$	Potencia Eléctrica $P_{elec} = U \cdot I_i$
Motor directo	1	+	+	+	+	+	+
Frenado directo	2	+	-	+	-	-	-
Motor inverso	3	-	-	-	-	+	+
Frenado inverso	4	-	+	-	+	-	-

Figura 16 - Signos de las diversas magnitudes en los cuatro cuadrantes

# MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Debe destacarse que el uso de reóstatos de arranque y regulación por medio de resistencias eléctricas señalados en este capítulo, aunque son métodos muy didácticos para comprender su aplicación en el control de las máquinas de c.c., en la actualidad han caído en desuso, debido a que en las resistencias se disipan grandes cantidades de energía en calor por efecto Joule, y de ahí los bajos rendimientos de estos accionamientos.

En la actualidad, con el gran avance de la electrónica de potencia, el control de los motores de c.c. se realiza con convertidores electrónicos: rectificadores fijos, rectificadores controlados y *choppers*.

Podemos adelantar aquí, a modo informativo, que los rectificadores convierten la c.a. en c.c. y solamente permiten el trabajo de la máquina de c.c. en el primer cuadrante. Los rectificadores controlados transforman la c.a. de la red en c.c. regulable, que incluso puede modificar el signo de la tensión de salida variando una señal de control de encendido, y es por ello que pueden trabajar en los cuadrantes 1 y 4; incluso añadiendo un grupo dual en oposición, una máquina de c.c. puede trabajar en los cuatro cuadrantes. El chopper es otro tipo de convertidor electrónico que transforma una c.c. en otra c.c. de valor medio regulable, permitiendo el trabajo de una máquina de c.c. en dos o en cuatro cuadrantes. Estos convertidores electrónicos se utilizan con profusión en tracción eléctrica.

Debe destacarse que desde la década de 1980, y debido a la incorporación del microprocesador en los equipos de control industrial, se utilizan también en los accionamientos eléctricos de velocidad variable los motores de c.a. asíncronos y síncronos, de tal modo que se puede conseguir el funcionamiento en cuatro cuadrantes de un modo similar a los motores de c.c. Los métodos de regulación son específicos del Control Electrónico de Motores llamado también Electrónica de Potencia.

**Otras curvas características:**  $I = f(\tau)$  Dado la expresión del par, este es proporcional a la corriente tanto en el motor de c.c. excitación independiente como en el derivación. En cambio en el motor serie, dado que la  $I_i$  es la que crea la Inducción  $B$  y el flujo  $\Phi$ , resulta el par proporcional al cuadrado de la corriente, por lo tanto la curva característica corriente de inducido-par resultan ser las siguientes:

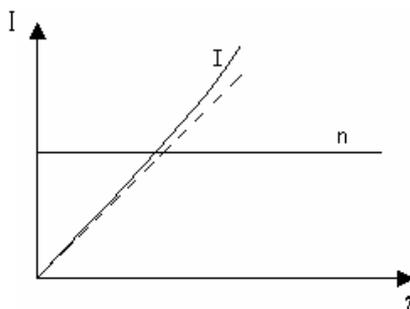


Figura 16 (a) Característica  $I=f(\tau)$   
Motor derivación y excit. indep.

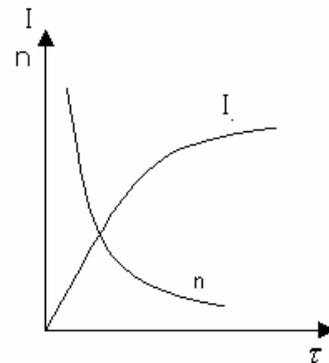


Figura 16 (b) Característica  $I = f(\tau)$   
Motor Serie

$I = f(\tau)$ ; La  $I$  crece proporcionalmente al par no es rectilínea por reacción de inducido.

..—ooOoo—..