

CAPÍTULO III

LOCOMOTORAS DIESEL-ELÉCTRICAS



CAPITULO III.- LOCOMOTORAS DIESEL ELÉCTRICAS

GENERALIDADES.-

El alto rendimiento del motor diesel es un factor poderoso para su elección como planta motriz. Es un motor con un par de tracción constante que no puede arrancar con carga, por lo cual requiere una transmisión con acoplamiento variable. Puesto que su característica principal es desarrollar una potencia constante, es ideal para servicios de patio y arrastre en desvíos, ya que puede proporcionar toda su potencia con bajas velocidades.

Las locomotoras diesel eléctricas tienen un generador de c.c. acoplado directamente al eje del motor diesel. Las modernas locomotoras utilizan, cada vez más generalizadamente, alternadores en combinación con rectificadores de potencia en reemplazo de los generadores de c.c. El generador envía su corriente a los motores de c.c. del tipo suspensión por nariz, de campo serie, que mueven las ruedas. El rango de velocidades depende de la relación de engranajes entre la corona montada en la rueda y el piñón del motor eléctrico y se selecciona según el tipo de servicio. Cuando se requieren grandes esfuerzos de tracción y bajas velocidades, la relación de engranajes es alta, mientras que para locomotoras de pasajeros de alta velocidad se selecciona una relación baja.

La mayoría de las locomotoras tienen entre 4 y 6 motores de tracción por unidad, igual que el número de ejes. Cuando se requieren altos esfuerzos de tracción se emplean seis motores, especialmente cuando se necesitan cargas bajas por eje.

MOTORES DIESEL.

Los motores diesel utilizados en las locomotoras pueden ser del tipo en V con ciclo de dos tiempos, en V con ciclo de cuatro tiempos, 6 u 8 cilindros en línea con ciclos de cuatro tiempos y 8, 10 y 12 cilindros con pistones opuestos y ciclos de dos tiempos. Los motores con ciclo de dos tiempos están equipados con un sobre alimentador o un soplador en la entrada de aire, movido por medio de engranajes desde el cigüeñal. Normalmente los motores de cuatro tiempos tienen sobre alimentador. La turbina del sobre alimentador, llamado también sobre cargador, se mueve por expansión de los gases de escape del motor y proporciona generalmente un incremento del 50% en la potencia. En los motores en V con ciclo de dos tiempos, el inyector de combustible montado en la cabeza de cada cilindro se emplea para medir la cantidad de combustible, así como para atomizarlo, mientras que en los motores de cuatro tiempos se cuenta con una bomba inyectora para cada cilindro, que envía al inyector una cantidad medida de combustible a alta presión en cada carrera.

El *governor* es una unidad electro hidráulica que regula la velocidad y la potencia desarrollada por el motor. Está integrado en un solo cuerpo montado en el motor y acoplado a uno de los ejes de leva. Está equipado con su propio abastecimiento de aceite y su propia bomba de alta presión.

En el governor hay cuatro solenoides operados por separado, o en combinación por medio de interruptores de aceleración movidos por el acelerador del maquinista y que controlan la corriente proveniente del generador auxiliar de 74 volts, que actúa sobre los solenoides. El acelerador del maquinista tiene ocho posiciones que corresponden, cada una, a un valor específico de las revoluciones del motor. El governor regula el valor predeterminado de las revoluciones del motor por medio de un mecanismo acoplado al control del combustible, y determina la cantidad de combustible medido que se inyecta a los cilindros.

Como la planta motriz formada por el motor y el generador principal funcionan como una fuente de potencia constante, el voltaje del generador principal se debe controlar para proporcionar una potencia de salida de valor constante en cada posición del acelerador, al variar las condiciones de velocidad, gradiente, características atmosféricas y calidad de combustible. El regulador de carga, que es una parte integrante del governor, cumple esto dentro de las máximas condiciones de seguridad del voltaje y la corriente del generador principal. Por ejemplo, cuando la locomotora encuentra un incremento en la gradiente de la vía, con una consecuente reducción de velocidad, la fuerza contra electromotriz del motor de tracción disminuye, provocando un cambio en la corriente del generador principal y del motor de tracción. Como esto altera la demanda de carga en el motor, la velocidad de éste tiende a cambiar para compensar. Al cambiar la velocidad, el governor ajusta las cremalleras de control de combustible, pero al mismo tiempo una válvula piloto en el governor dirige la presión hidráulica a un motor en el regulador de voltaje, que cambia los valores de la resistencia en el reóstato del regulador de carga en serie con el circuito de excitación del generador principal. Esto altera la corriente de excitación del generador principal y, consecuentemente, el voltaje del generador principal, y hace que la potencia de salida regrese a su valor normal. Las cremalleras de control de combustible regresan a su posición normal de acuerdo con el valor constante de R.P.M. del motor.

El regulador de voltaje es efectivo dentro de los límites máximo y mínimo del reóstato. Fuera de estos límites la potencia de salida del motor se reduce. Sin embargo, se cuenta con dispositivos de protección en el circuito de excitación del generador principal, que limita las salidas de voltaje para asegurar que la corriente y el voltaje en los circuitos del motor de tracción estén dentro de los límites de seguridad.

Equipo eléctrico de tracción

El generador principal tiene en general varios devanados inductores en el estator, por ejemplo, en serie, en paralelo, diferencial, a batería (excitado independientemente por otro generador menor llamado excitatriz), y de arranque. Este último se emplea cuando se toma energía de la batería de la locomotora para arrancar el motor.

En las locomotoras GE tipo Dt- 13.100, la excitación para el generador principal es entregada por la excitatriz, un generador tipo GY-50-A1. La excitatriz tiene tres campos: 1) Batería, 2) Propio, 3) Diferencial. La salida de la excitatriz, al ser controlada por estos campos, controla a su vez la salida del generador principal.

Del circuito de control de 75 volts c.c se alimenta el campo de batería de la excitatriz. Las cantidades de excitación para cada velocidad del motor, determinada por la posición del acelerador, es limitada por las resistencias del panel de excitación (EXR3). Estas resistencias se insertan o

remueven del circuito, por apertura y cierre de los contactores de dedos operados por levas (camos) del controlador de aceleración de acuerdo a la posición (punto) de la manija. Si la manija aceleradora es movida un punto hacia arriba aumenta la velocidad del motor, la resistencia en el circuito se baja, de modo que pueda aumentar la corriente de excitación F1 - F2. Este aumento en la corriente F1 - F2 causará que aumente el voltaje de la excitatriz.

La excitación de batería también es limitada por un reóstato de control de carga operado por el gobernador. La posición del reóstato limita la excitación F1 - F2, de modo que la demanda eléctrica del generador sea igual a la capacidad de potencia del motor. El movimiento del reóstato en su parte activa aumenta la resistencia y disminuye la corriente en el campo F1-F2.

La auto-excitación para la excitatriz la proporciona el campo propio (F3-F4). Los amperes vuelta provistos por el campo propio se suman a los amperes vuelta del campo de batería. Cuando la manilla del acelerador sube, aumenta la velocidad de rotación de la excitatriz, provocando el aumento de la auto-excitación.

El campo diferencial (F5-F6) está conectado en paralelo con el campo de conmutación del generador principal y, por consiguiente, su corriente es proporcional a la corriente de armadura del generador principal. Los amperes vuelta proporcionados por el campo diferencial se restan a los provistos por los campos de batería y auto-excitación.

La potencia de salida del generador se controla: 1) *variando la velocidad del motor mediante el movimiento del controlador por el maquinista* y 2) *regulando la intensidad de la corriente en el campo de batería del generador principal o en el campo de un excitador independiente*. Los campos en paralelo y diferencial (si se emplean) están diseñados para hacer que la potencia de salida del generador sea constante con una velocidad dada del motor, aunque el voltaje y la corriente en la armadura varíen, esto se consigue sólo parcialmente.

Aparatos generadores auxiliares

La energía de corriente continua para cargar la batería, alumbrado y control, se obtiene de un generador independiente, engranado o movido por correa por el generador principal. La salida de voltaje se regula a 74 volts en el rango completo de velocidades del motor, con una variación de 1 %. También puede disponerse de un generador independiente para suministrar corriente a los ventiladores que se emplean para enfriar los motores de tracción y/o ventiladores de los radiadores.

Los motores de tracción emplean campos de excitación en serie. La corriente de los campos serie se invierte para cambiar el sentido de marcha de la locomotora y también puede derivarse (shuntarse) parcialmente por medio de resistencias para reducir la contra fuerza electromotriz a medida que aumenta la velocidad de la locomotora.

Controles Eléctricos

Para cortar y abrir los circuitos adecuados en los motores de tracción y el generador principal se emplean **contactores** electro neumáticos con interconexiones para cubrir varias funciones del circuito de control. Los contactores operados magnéticamente se emplean para los circuitos de excitación y potencia de bajo amperaje. Para invertir la corriente del campo de los motores de tracción (reversa) o para armar los circuitos del freno dinámico, se emplean dispositivos que mueven

una leva interruptora accionado electroneumáticamente, que consiste generalmente de un tambor de dos posiciones con segmentos de cobre que se mueven entre escobillas o dedos cargados a resorte. Este interruptor no está proyectado para accionar con carga.

Se emplean relés eléctricos en los circuitos de alarma y control, que normalmente trabajan a 75 volts y 1 ampér o menos. Las bobinas actuadoras de los relés actúan con los 75 volts del sistema de control o pueden precalibrarse para operar con un nivel determinado de voltaje, como por ejemplo, el equipo de transición. Los relés de deslizamiento de las ruedas operan al sentir la diferencia en la magnitud de la corriente entre las armaduras de dos motores conectados en paralelo o al sentir la diferencia en la caída de voltaje entre las armaduras de dos motores conectados en serie.

Cuando se acoplan dos o más locomotoras en múltiple, los movimientos de la palanca de control de aceleración o del freno dinámico o cuando se produce la transición, en la unidad que controla el maquinista (locomotora de comando), se transmite por los circuitos de control y propulsión al equipo de potencia de cada unidad conectada en múltiple. Antes de aplicar potencia, los inversores de marcha deben colocarse en la posición adecuada para establecer el movimiento deseado tomando en cuenta la posición de cada unidad. Los contactores de potencia completan los circuitos correspondientes entre generador y motores.

El deslizamiento de las ruedas se detecta por algún equipo medidor de la velocidad, conectado eléctricamente a los circuitos del motor o mecánicamente a los ejes. Cuando hay deslizamiento, los relés reducen automáticamente la excitación del generador principal o la velocidad del motor, hasta que desaparezca el problema y después se vuelve a aplicar gradualmente la potencia. En la cabina de control se cuenta con una luz y una chicharra de alarma que avisan al maquinista, el cual debe reducir los aceleradores si la condición persiste. En las locomotoras más modernas se ha introducido la tecnología de los microprocesadores y de la electrónica en general, los cuales han mejorado la sensibilidad de estos sistemas incrementando con ello el poder de arrastre de las locomotoras.

Baterías

Para el arranque del motor diesel se emplean baterías de plomo-ácido o del tipo alcalino, de una capacidad entre 200 a 400 A-h.

Frenado dinámico

En algunas locomotoras se complementa el sistema de frenos neumáticos con frenos dinámicos. Los motores eléctricos de tracción se usan como generadores para transformar la energía cinética de la locomotora y los vagones en energía eléctrica, que se disipa en rejillas de resistencia eléctrica colocadas cerca del techo. Ventiladores acoplados a motores eléctricos que utilizan parte de esta misma energía hacen circular aire a través de estas rejillas sacando el calor hacia el exterior, reduciendo con ello el tamaño de estas resistencias en consonancia con el espacio relativamente pequeño de que se dispone en la locomotora.

Por medio de un conmutador a leva accionado electroneumáticamente, los motores eléctricos se conectan a las resistencias de descarga; sus campos se conectan todos en serie a través del generador principal para obtener la corriente de excitación necesaria. La magnitud de la fuerza de frenado se controla variando la velocidad del motor de la locomotora o la excitación del generador principal. Los frenos dinámicos generalmente no son eficaces abajo de los 16 km/h, pero son muy

útiles con velocidades entre 32 y 48 km/h, particularmente en descensos prolongados, donde el desgaste de las zapatas de freno sería considerable. Otras ventajas que se obtienen son la regulación más suave de la velocidad del tren, la reducción en el número de fisuras por el calor en las ruedas, y la disminución de trabajo que representa para el personal, ya que no se tienen que ajustar los retenes de los frenos de aire de los carros de carga.

En el circuito de excitación se debe incorporar un dispositivo de protección automático que limite a una intensidad máxima las corrientes en los motores. En la cabina de mando hay una luz o chicharra de alarma para indicar que se tiene el máximo de frenado dinámico y que se deben emplear los frenos de aire para incrementar el frenado del convoy.

UTILIZACIÓN DE LA POTENCIA DE TRACCION

Potencia y Rendimiento de Locomotoras Diesel

Potencia Nominal.-La potencia disponible en el enganche de una locomotora Diesel es el resultado de una serie de restas a la potencia nominal del motor, debido a las pérdidas provocadas por el rendimiento del equipo de transmisión y por la demanda de los equipos auxiliares. La potencia **nominal** puede calcularse por la relación :

$$HP = \frac{PLAN}{K}$$

en que K = 456327 si P [Kg/cm²] Presión media en cil.

L [cm] carrera émbolo

A [cm²] área del émbolo

N número de ciclos

El factor **P** está regido por las condiciones generales del motor, la calidad del combustible, el gasto de combustible inyectado, la eficiencia de la combustión, la razón de compresión, etc. Los factores **L** y **A** son fijos y dependen del diseño del motor. El factor **N** es una función de la velocidad del motor. En la práctica, la potencia nominal es la que señala la placa del fabricante.

Potencia en el Eje.- Es la potencia nominal menos las pérdidas por fricción en los descansos y engranajes. También debe restarse la potencia empleada para mover las bombas de lubricante y de agua, el governor y el ventilador de barrido. La potencia resultante se denomina **potencia efectiva en el eje**.

Potencia en la Vía.- Una parte de la potencia en el eje del motor se transmite mecánicamente por medio de engranajes y/o correas a los ventiladores de los motores, al compresor para el freno de aire, al generador auxiliar y al ventilador de enfriamiento. En algunos casos parte de la energía eléctrica del generador se emplea para algunos sistemas auxiliares. El resto de la potencia en el eje del motor Diesel se convierte en energía eléctrica para fines de tracción en el generador principal, la cual resulta de multiplicar esta diferencia por el rendimiento del generador (generalmente del orden del 91 %). Este resultado a su vez multiplicado por el rendimiento de los motores de tracción (incluyendo los otros elementos del circuito de potencia), y el rendimiento de la transmisión, en que la energía eléctrica se convierte nuevamente en energía mecánica, entrega lo que se llama **potencia**

en la vía.

La potencia de salida del generador principal empleada para la tracción puede expresarse como :

$$\text{Watts}_{\text{motor}} = E_g \times I_m, \text{ donde}$$

E_g = voltaje del generador principal, volts

I_m = corriente del motor de tracción, amperes
multiplicada por el número de circ. paralelos

La potencia en la vía puede expresarse por :

$$\text{Pot. Vía (HP)} = V \text{ (km/h)} \times F \text{ (kg)} / 270$$

donde F es el esfuerzo de tracción en la vía (Ver Capítulo I)

UTILIZACIÓN DE LOCOMOTORAS DIESEL-ELÉCTRICAS

Velocidad y Fuerza de Tracción.- Con el acelerador completamente abierto las pérdidas varían ligeramente con los diferentes valores de la velocidad y la fuerza de tracción. En Anexo N° 3 se adjuntan gráficos con las **Curvas de Esfuerzo de Tracción** de algunas de las principales locomotoras de EFE. Las curvas típicas de velocidad-esfuerzo de tracción son aproximadamente hiperbólicas, dado que la potencia, que es el producto entre ambas variables es constante en una locomotora diesel, de modo que cuenta con toda la potencia disponible en la gama entera de velocidades.

Características de los Motores de Tracción.- El motor más utilizado en tracción es el tipo excitado en serie a c.c., aunque últimamente se están empleando cada vez más los motores a c.a. monofásicos y trifásicos de inducción (jaula de ardilla). Nuestras locomotoras diesel emplean motores de tracción de c.c. tipo serie.

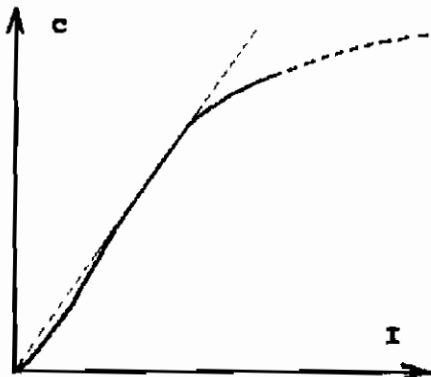


Fig. 1.-

En un motor eléctrico el par motor, o cupla motriz como se le llama, depende de la corriente por la armadura y del flujo magnético del campo. Este último depende de la corriente de excitación. En un motor serie, la corriente en la armadura es la misma que excita el campo, por lo tanto, la cupla motriz es función de la corriente al cuadrado. Una curva típica de la cupla motriz en función de la corriente del motor es la que se muestra en la

Fig. 1. El diámetro de la rueda y la relación de engranajes especifican también el par motor en función de la fuerza de tracción.

Los motores de tracción se seleccionan generalmente en función de la corriente de trabajo continuo máximo, es decir, la corriente cuyo efecto de calentamiento, debido a las pérdidas por $I^2 R$ en los enrollados de la armadura y los campos, es suficiente para elevar la temperatura del motor a su límite máximo de seguridad, cuando el aire de enfriamiento circula, por efecto de ventiladores que trabajan en condiciones normales, a la máxima temperatura ambiente esperada. La operación continua con este nivel de corriente hace que el motor opere a su nivel máximo de seguridad, y que el calor generado sea exactamente igual que el calor disipado. La fuerza de tracción correspondiente a esta corriente es, en general, un poco menor que el límite de adherencia. El maquinista debe restringir la operación cuando se conducen trenes pesados con pendientes fuertes, de lo contrario el exceso de calentamiento producirá efectos perniciosos en los motores como el envejecimiento prematuro de los materiales aislantes de los enrollados, el desprendimiento de soldadura en las cabezas de delgas, lo que puede a su vez producir chisporroteo en las escobillas por interrupciones de los circuitos, también se pueden producir interrupciones en las uniones de los campos.

La locomotora viene equipada con un instrumento llamado amperímetro de carga de los motores de tracción, el que le indica al maquinista la corriente que están tomando dichos motores. En algunas locomotoras (Dt-13.100) para facilidad del maquinista, la carátula del amperímetro de carga está marcada con una zona de color verde, otra de color amarillo y una zona roja. En el caso de la 13.100 la zona verde es de trabajo continuo hasta 300 Amperes. La zona amarilla trae marcada al comienzo 60 minutos enseguida viene marcada 15, 8 y 4, lo que quiere decir lo siguiente:

Zona Verde	300 Amp.	Trabajo Continuo
Zona Verde Final	360 Amp.	Trab. sólo 60 min.
Zona Amarilla 15	390 Amp.	Trab. sólo 15 min.
Zona Amarilla 8	420 Amp.	Trab. sólo 8 min.
Zona Amarilla 4	480 Amp.	Trab. sólo 4 min.

Transición .- La función primaria del equipo regulador de carga es controlar la excitación del generador principal, para utilizar la potencia generada por el motor en la producción de tracción en el rango completo de velocidades de la locomotora.

Como en el extremo de alta fuerza la corriente es alta (curva de Fig. 1), y en el extremo opuesto es baja, el voltaje del generador principal debe regularse para mantener aproximadamente constante el producto del voltaje por el amperaje. El diseño del generador y los motores de tracción impone limitaciones prácticas en ambas direcciones.

En la Curvas Características del Generador, que se adjuntan en el Anexo N° 3, se presentan las curvas corriente-voltaje del generador principal de las locomotoras diesel de EFE. En general en las locomotoras, para mantenerse dentro de los límites y cumplir con lo deseado, se emplean dos tipos de circuitos principales de potencia : 1) *transición* y 2) *shuntaje de los campos*. Algunas veces se combinan ambos. En la Fig. 2 los motores quedan conectados en serie durante el arranque, cerrando solamente el contactor S1. Al disminuir la demanda de corriente, el contactor S1 se abre y se cierran los contactores P1 y P2, quedando una conexión en serie-paralelo.

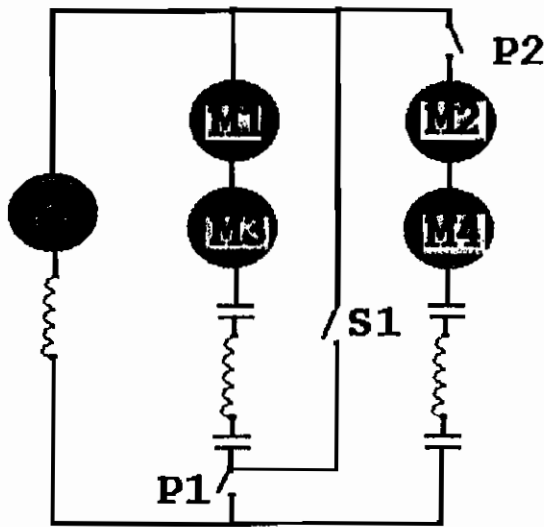


Fig. 2. Circuito Transición Serie-Paralelo

Shuntaje de Campos. En la Fig. 3, los motores se encuentran permanentemente en serie-paralelo. Al disminuir la demanda de corriente, se cierran los contactos Sh1 y Sh2 para alcanzar puntos específicos de la curva de corriente-voltaje del generador, reduciendo la corriente en los campos de los motores de tracción. Por ejemplo, si M1 y M2 se cierran a aproximadamente 30 Km/h, la demanda de corriente en el motor aumenta súbitamente para mantener la misma fuerza de tracción. El efecto del shuntaje reduce también el voltaje necesario del generador a esta velocidad y, por tanto, permite alcanzar un punto más alto sobre la curva. Al seguir aumentando la velocidad de

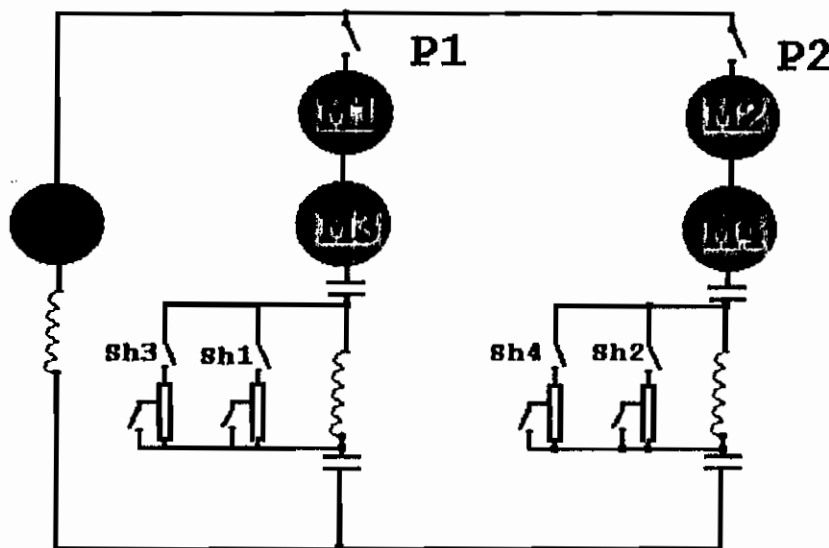


Fig. 3.- Circuito Shuntaje Campos.

la locomotora, la demanda de corriente se reduce gradualmente hasta que se cierra un segundo

conjunto de contactos (Sh3/Sh4).

FRENADO DINÁMICO

El frenado dinámico en una locomotora diesel consiste en hacer trabajar los motores de tracción como generadores y descargar esta energía en unas parrillas llamadas resistencias de freno.

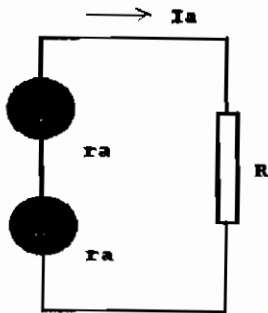


Fig. 4.- Circuito Freno Dinámico

El frenado dinámico ha resultado ser una gran ayuda en la operación de trenes donde existen pendientes importantes, por el mejor manejo que se obtiene y el ahorro en las zapatas que se emplean en el frenado mecánico.

Generalmente se adopta el esquema eléctrico de la Fig. 4, en el circuito principal por cada pareja de motores. Los motores de tracción funcionan como generadores, aprovechando la fuerza de inercia y/o gravedad en pendientes, conectados a una resistencia R en donde la corriente generada disipa en forma de calor la energía desarrollada por el efecto del frenado.

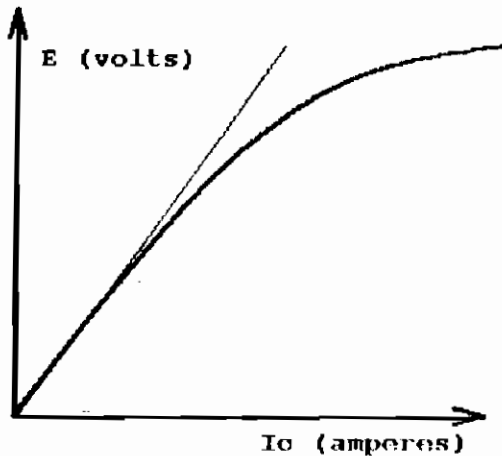


Fig. 5.-

Los campos de los motores de tracción son alimentados en forma separada por el Generador Principal de la locomotora; de modo que la corriente que recorre estos campos es de sentido opuesto a su funcionamiento como motores en el sentido de marcha correspondiente.

La f.e.m. generada E depende de la velocidad y del flujo Φ , el cual a su vez es función de la corriente de excitación I_c . El Φ como se sabe, debido a la saturación del hierro que conforma los pares de polos, para una velocidad dada, tiene una variación con respecto a la excitación en lo que se conoce como la **curva de saturación** (Fig.5), que

naturalmente influye en todos los otros parámetros, como E, V, Ia, de modo que resulta importante encontrar una expresión matemática de la curva de saturación. Como tal relación es desconocida, lo mejor que se puede hacer es representar la curva de saturación por una ecuación empírica determinada por *Froelich*, la cual puede escribirse como:

$$E = an \frac{I_c}{b + I_c}$$

a y b son constantes; n = velocidad (rpm) ; I_c = Corriente campo (amperes)

Por otra parte, en el circuito formado por las armaduras y la resistencia de descarga tenemos:

$$2E = I_a (2r_a + R)$$

La potencia en HP que desarrolla mecánicamente la fuerza de frenado de cada motor F_1 es:

$$HP = \frac{F_1 * V}{3,6 * 75}$$

La potencia eléctrica que desarrollan las armaduras en HP es:

$$HP = \frac{E * I_a}{736 * \eta_m}$$

η_m = rendimiento transmisión

Por tanto,

$$\frac{F_1 * V}{3,6 * 75} = \frac{I_a^2 * (2r_a + R)}{2 * 736 * \eta_m}$$

Por lo que

$$F_1 = \frac{0,1834}{\eta_m} \frac{I_a^2}{V} (2r_a + R)$$

Suponiendo un rendimiento = 90%

$$F_1 = 0,2 \frac{I_a^2}{V} (2r_a + R)$$

Con la curva característica en vacío a una velocidad dada fija, se pueden obtener los valores de las constantes a y b, en el rango de trabajo, y de este modo encontrar la relación entre E, n e I_c . Por otro lado con los parámetros de la locomotora R, r_a , se puede establecer las condiciones de trabajo y construir la curva característica del frenado dinámico.

Ejemplo.- En la locomotora Dt-13.100 de GE se encontraron los siguientes valores:

$$R = 3 * 0.556 \text{ ohms}$$

$$r_a = 0.019 \text{ ohms}$$

Para la zona de trabajo entre 100 y 500 amperes de campo, con la característica en vacío de los motores, trabajando como generadores, se determinaron las constantes a = 1,22 y b = 547, de modo que:

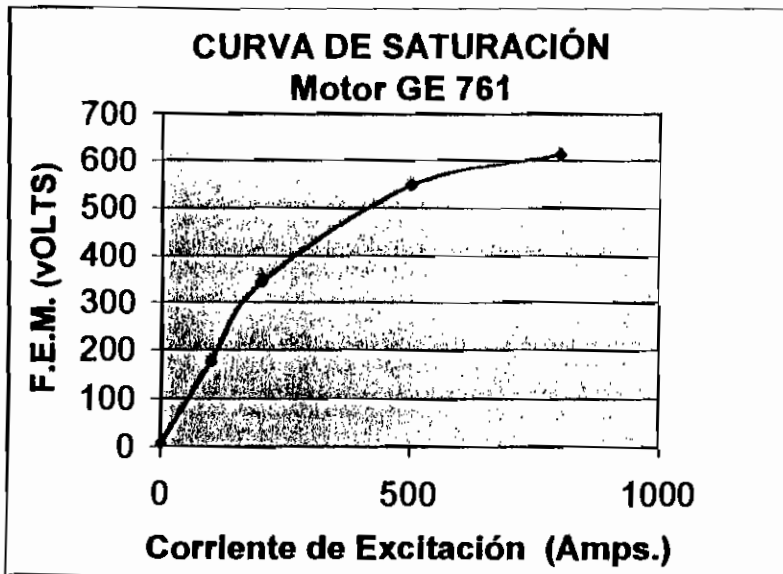
$$E = \frac{1,22 * n * I_c}{547 + I_c}$$

Con los valores de R y r_a se determina la relación entre E e I_a de modo que:

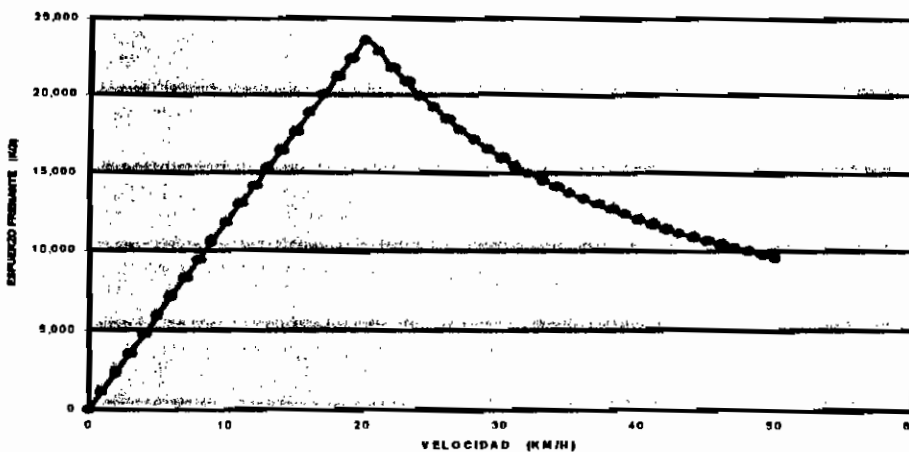
$$E = 0.8435 I_a$$

Hay que asumir que la corriente que recorrerá las parrillas de descarga, tiene un valor máximo que no podrá superarse, y por lo tanto el circuito debe proveer la regulación necesaria para limitar esta corriente. Esto se efectúa a través del circuito de excitación de la "excitatriz", la que a su vez alimenta el campo del generador principal.

De este modo es posible construir la curva característica del frenado dinámico que se muestra.



FRENADO DINÁMICO



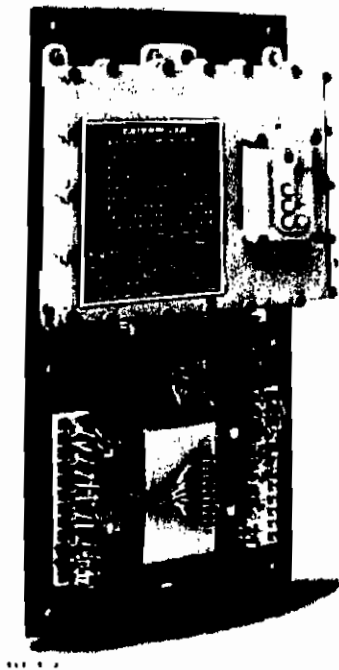
NUEVAS LOCOMOTORAS DIESEL

Lo descrito anteriormente corresponde al diseño básico de las locomotoras diesel eléctricas actualmente en funcionamiento en nuestro país. Las locomotoras que conocemos en EFE no cabe duda que están pasadas de moda en el actual mundo ferroviario. Las últimas décadas han sido claves en el desarrollo tecnológico, saliendo al mercado generaciones de nuevas locomotoras que han introducido mejoras notables en el desempeño y en la rentabilidad. Aunque en el motor mismo diesel, después de los avances de los años 70s, la tecnología del motor diesel para la tracción ferroviaria entró en un período de consolidación, centrando la prioridad en mejorar los diseños existentes, más que innovar.

Los grandes avances de la tecnología de los últimos tiempos han sido bien aprovechados por la industria dedicada a la tracción ferroviaria. Es común ahora encontrar en las locomotoras sofisticados sistemas electrónicos que aseguran un mejor desempeño que los tradicionales electromagnéticos, a menor costo y mantención. Los microprocesadores y elementos de estado sólido son los encargados de manejar la mayoría de los sistemas de control y maniobra de las locomotoras.

Los principales cambios o mejoramientos casi se han centrado en la parte eléctrica de las locomotoras como son : Cambio del **generador principal** de c.c. por un **alternador trifásico**; lo anterior se complementa con **rectificadores de silicio**, generalmente con un banco de rectificadores por cada bogie; otra mejora es alimentar los **M.T. siempre en paralelo**, evitando con ello un mejor control de la potencia ejercida al evitar el patinaje que se produce generalmente con la conexión en serie de los motores; se mejora la calidad de los **elementos aislantes**, con una serie de productos nuevos, con lo que se permite el trabajo de los motores a **más alta temperatura** sin deterioro de sus componentes. Se introducen **equipos electrónicos** para diversas funciones, como por ejemplo, el **control de patinaje**, mucho más sensibles y exactos que los tradicionales electromagnéticos. Con el uso de los **microprocesadores** se mejora aún más el desempeño de los sistemas electrónicos. Con microprocesadores se controlan los sistemas de manejo de las locomotoras , proveen monitoreo de la operación, realizan ajustes automáticos, analizan fallas y entregan diagnósticos al maquinista, el que puede interactuar para corregir, entregan registros, etc. Una verdadera revolución en el diseño de los equipos de tracción se ha producido con la introducción del **tiristor apagado por compuerta**, conocido como GTO (Gated turn off)¹.

¹ Mayores detalles se dan en el Capítulo dedicado a la Tracción Eléctrica



En los motores diesel, como decíamos, la tecnología se ha aprovechado para mejorar los diseños existentes, antes que realizar grandes innovaciones. Un importante mejoramiento es lo que la industria automotriz conoce como "sistemas de manejo del motor". Estos sistemas basados en microprocesadores han sido el siguiente paso de gobernadores electrónicos existentes y permiten que la operación del motor sea optimizada aún más precisamente en un amplio rango de velocidades y potencias.

Caterpillar, por ejemplo, tiene su *Programmable Electronic Engine Control* (PEEC) que integra el gobernador del motor con el control de carga del alternador para minimizar el consumo de combustible, (Foto al lado). El PEEC ilustra la sofisticación a la que los microprocesadores conducen las estrategias de control del motor. Por ejemplo, cuando hay demanda de potencia, el rango al cual la velocidad del motor sube o baja, es completamente ajustable, con programas separados seleccionables, para trabajo en línea principal o en patio de maniobra. El control de patinaje de ruedas y la descarga del generador son también integrados dentro del sistema.

LOCOMOTORAS DIESEL CA

Las locomotoras diesel están realizando desempeños sin precedentes gracias a los sistemas de tracción de corriente alterna (CA). La mayor parte de este mejor desempeño se debe al principio básico de la tracción ferroviaria - la **adherencia**. Efectivamente, las actuales locomotoras diesel eléctricas CA brillan por su desconcertante mejor poder adherente conseguido. Las locomotoras modernas CC, tales como las GM SD70 y SD75, y las GE Dash 8 y Dash 9 por ejemplo, han alcanzado un máximo de 30 % de adherencia en rieles secos. En comparación, las GM SD 9043MAC y GE AC4400 han alcanzado en promedio 34 a 38 % de adhesión en casi todas las condiciones climáticas, y que, dicen los proponentes CA, están recién comenzando. Mientras algunos estudios indican que el desempeño de la adhesión CC puede alcanzar su peak práctico en el rango del 30 %, las locomotoras CA han alcanzado adherencias por sobre el 45 % en pruebas. El límite superior de la tracción CA es todavía desconocido, pero los ingenieros de diseño hablan entusiastamente de alcanzar un factor del 50 % de adherencia en el futuro previsible.

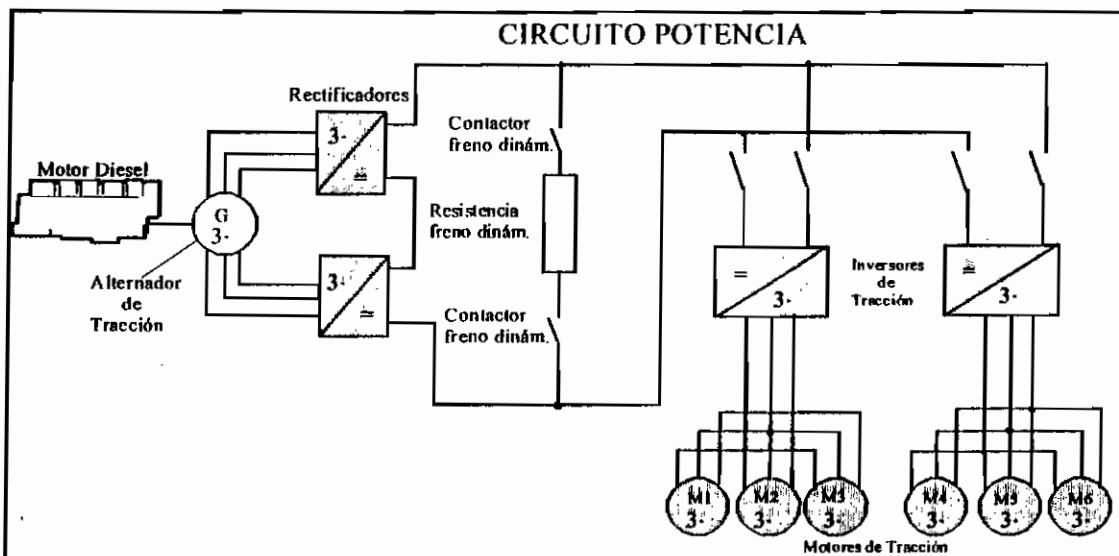
Los motores de tracción CA son más simples, más eficientes y más confiables que los motores CC que se han usado tradicionalmente desde el comienzo de la tracción diesel eléctrica. Robustos por naturaleza, los motores de tracción CA consisten de una carcasa, conocida como "estator" y una armadura rotante, o "rotor". El estator convierte la energía eléctrica trifásica en un campo magnético rotatorio dentro del motor. El rotor tipo "jaula de ardilla", recibe el impulso de la fuerza magnética, girando en correspondencia al campo magnético, su velocidad y dirección está determinada por la potencia entregada al motor.

Una contundentemente eficiente máquina, el motor CA elimina las escobillas y el colector que se encuentran en los motores CC. Esto no sólo reduce el asunto de la mantención, sino que también

elimina potenciales cortocircuitos, flashes y fugas a tierra a los cuales los motores DC están acostumbrados. En suma, los motores CA tienen menos probabilidad para deslizar, son más inmunes a daños, y con optimismo serán capaces de correr un millón de millas entre overhauls. Una de las más grandes ventajas, sin embargo, es la carga térmica extrema que pueden soportar los motores AC. Los rangos de corto tiempo - limitaciones que se imponen en un corto período de tiempo que los motores de tracción pueden operar bajo cargas pesadas antes de sufrir daños de sobrecalentamiento - son cosa del pasado con la tracción CA.

Ingenieros de ferrocarriles que operan pesados trenes de carga dicen que *"el límite térmico real de los motores CA todavía no ha sido alcanzado en operación"*.

La locomotora CA es una compleja máquina que produce corriente CA en el alternador, convertida a CC y luego vuelta a una tosca forma de corriente alterna antes de entregarla a los motores de tracción. En ambos tipos de locomotoras la CA y la convencional CC, el alternador principal produce corriente AC, la cual es pasada por rectificadores y convertida en potencia de corriente continua (CC). En las locomotoras CC, esta corriente es enviada directamente a los motores de tracción CC. En las locomotoras CA, la potencia CC de los rectificadores es enviada a bancos de inversores, cuyos GTOs (dispositivos "Gated Turn Off", o sea tiristores apagados por compuerta) "chopean"² la potencia DC para efectivamente producir la potencia AC trifásica con la cual se alimentan los motores de tracción. Cada banco inversor requiere un total de seis GTO - tres positivos, tres negativos.



Hay algunas diferencias fundamentales entre los paquetes de inversores y sistemas de control de tracción CA empleados por las diesel CA de General Motors y General Electric. Las unidades GM están equipadas con un banco inversor por boguie, con un total de 12 GTO=s en dos bancos inversores. Las GE emplean un banco inversor por cada motor de tracción, dando 36 GTO=s en 6 bancos inversores. Otra diferencia de los dos sistemas es que los inversores GM son enfriados con

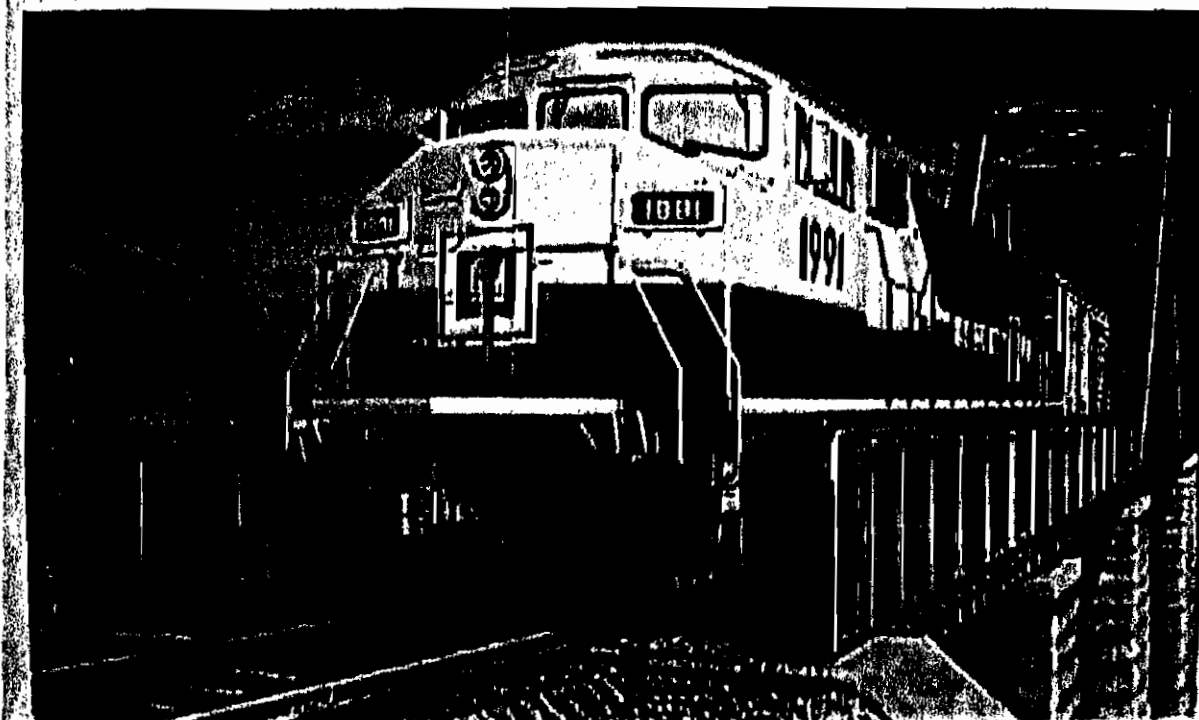
² Sistema de corte electrónico capaz de convertir una corriente continua en corriente alterna de onda cuadrada.

líquido, mientras que los GE se enfrían con aire.

El sistema de control del motor de tracción de General Electric tiene numerosas ventajas, no menor es la habilidad para aislar o segregar individualmente los motores de tracción y luego ajustar la salida y velocidad de cada motor de tracción individualmente. En efecto, una AC 4400 con un motor de tracción segregado puede continuar operando a plenos 4400 HP con los otros cinco motores.

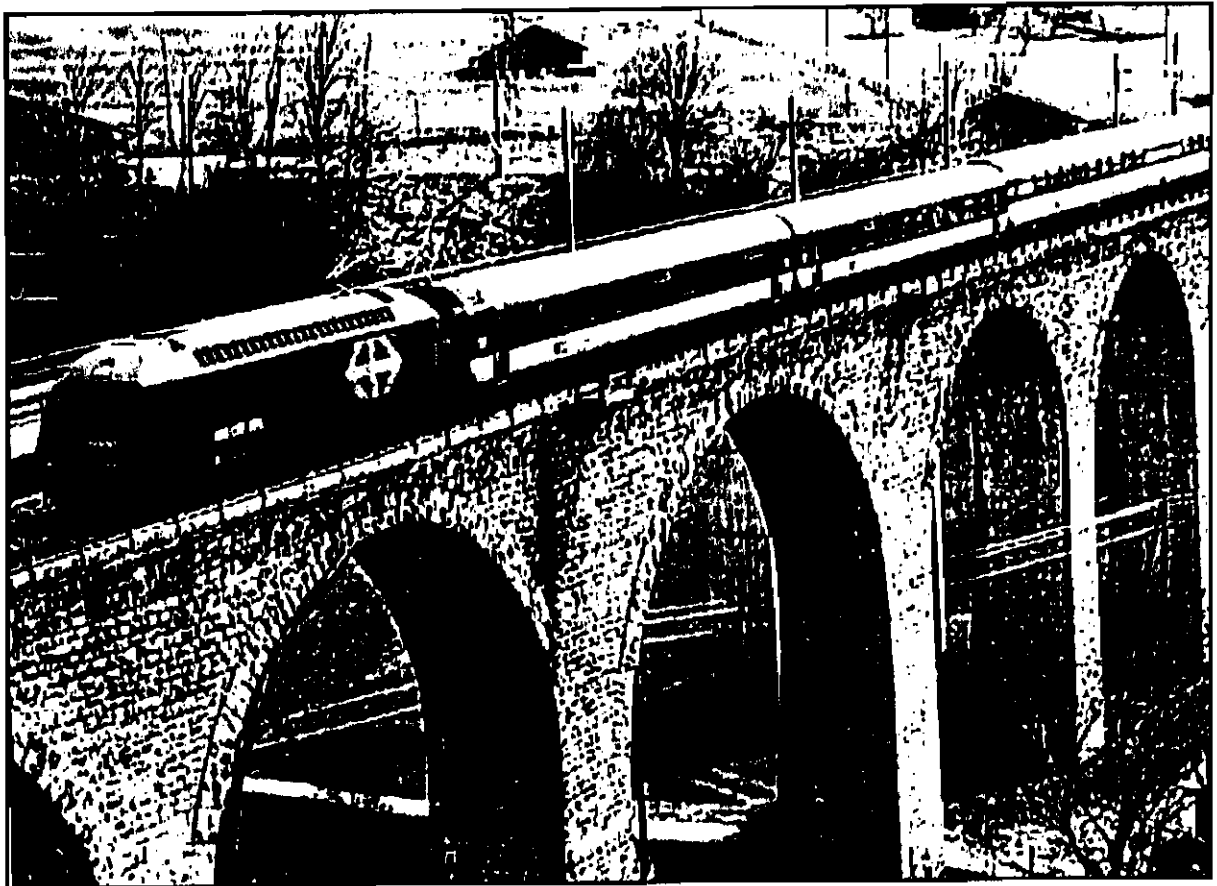
SD60MAC

Three-Phase Diesel-Electric Locomotive



CAPÍTULO IV

TRACCIÓN ELÉCTRICA



CAPÍTULO IV TRACCIÓN ELÉCTRICA

1. Generalidades

En la tracción eléctrica es necesario transportar, transformar, distribuir y utilizar la energía eléctrica entregada por alguna compañía productora.

El circuito de tracción eléctrica está constituido por la subestación, líneas de alimentadores, una línea de contacto suspendida por una catenaria, una locomotora o automotor que utiliza la energía y un retorno a través de los rieles. Este circuito tiene como característica que puede ser de bastante largo y de tener una resistencia eléctrica variable en función de la posición de las cargas del sistema con respecto a las subestaciones.

Los sistemas de tracción eléctrica usan indistintamente corriente continua (c.c) o corriente alterna (c.a.) para alimentar la catenaria o línea de contacto. Los sistemas que utilizan c.c requieren subestaciones rectificadoras para convertir la c.a que entregan las compañías de electricidad. En cuanto a los sistemas de tracción dentro de las locomotoras, han habidos diversas escuelas o tendencias, donde por muchas décadas predominó el uso de motores de tracción tipo serie de c.c, dada las excelentes condiciones de torque a bajas velocidades, pero en las últimas décadas, mediados de los '80s en adelante, ha crecido el uso de los motores a c.a asíncronos trifásicos, independiente del tipo de alimentación a la locomotora.

En Chile, la electrificación comenzó en el año 1924, entre Santiago y Valparaíso, con un sistema de alimentación a c.c de 3.000 volts. Posteriormente en la década de los '60s, se prosiguió la electrificación de Santiago al Sur, con el mismo tipo de alimentación.

Los sistemas de c.c utilizan tradicionalmente voltajes de 750, 1.500 y 3.000 volts. Los sistemas de c.a han utilizado tensiones de 11 Kv. a 25 hertz, 15 Kv. y 16 $\frac{2}{3}$ hertz, 20 a 25 Kv. con frecuencia industrial de 50 o 60 hertz y hasta 50 Kv. con 50 hertz. Los sistemas a c.a resultan menos costosos que los de c.c en lo que se refiere a instalaciones fijas. Por algún tiempo las locomotoras a c.a resultaban más complicadas que las que utilizaban la c.c, pero en la actualidad, por el uso de la electrónica de potencia, da lo mismo el sistema de alimentación que se emplee.

Efectivamente, grandes cambios han alcanzado los sistemas de tracción eléctrica en los últimos años, con las mejoras tecnológicas que han permitido los avances de la electrónica de potencia, con los semiconductores: diodos, tiristores, GTO, etc. Esto ha permitido la sustitución del tradicional motor de tracción de c.c con colector, por el motor de inducción trifásico de c.a alimentado con "inversores" de frecuencia variable, que además de ser más económicos en su construcción y mantención, ofrecen espectaculares mejoras en el funcionamiento.

Tipo de Locomotoras Eléctricas.

Las locomotoras eléctricas se clasifican de acuerdo al sistema de alimentación y al tipo de motor de tracción empleado. Así tenemos:

- A. Locomotoras con alimentación c.c.
 - A.1. Motor serie cc y reóstato de partida.
 - A.2. Motor serie cc y chopper de control.
- B. Locomotoras con alimentación c.a.
 - B.1. Motor serie cc con rectificadores.
 - B.2 Motor ca monofásico.
 - B.3. Motor ca trifásico con control de frecuencia variable.
- C. Locomotoras Especiales Bicorriente (cc y ca) con distintos voltajes de alimentación en trolley.

En este Capítulo se verán principalmente los sistemas utilizados en Chile, que tiene los equipos más tradicionales, pero también daremos un vistazo a sistemas y equipos más modernos.

2. SISTEMAS DE TRACCIÓN CON MOTORES DE C.C.

Por ser el motor más utilizado en nuestro país, nos referiremos en extenso en primer lugar al motor de c.c tipo serie. Hay tres grupos de motores de c.c, el motor serie, el motor shunt y el motor compound.

La propiedad de la reversibilidad de la máquina dínamo eléctrica, en lo que respecta a los motores de c.c, se anuncia diciendo que cualquiera sea el sistema de excitación, si la polaridad permanece la misma, el sentido de rotación de la máquina funcionando como motor, es contrario al que ocurre para girar el inducido para que genere corriente del mismo sentido del que alimenta la máquina en su funcionamiento como motor.

Para el estudio de los motores deben conocerse las curvas características electromagnéticas, que son: la relativa a la velocidad, al torque o cupla motriz y al rendimiento en función de la corriente absorbida. Para los asuntos de la tracción sirve sobre todo la característica mecánica, que da la cupla motriz (o esfuerzo de tracción) en función del número de revoluciones de los motores.

a) FUERZA CONTRA ELECTROMOTRIZ: E.-

Esta es de sentido contrario a la diferencia de potencial U que alimenta el motor y que esta dada por:

$$E = \frac{p}{a} * n * N * \Phi * 10^{-8}$$

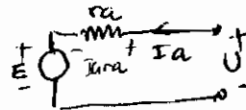
volts

$2p$: N° de polos
 $2a$: N° de ramas paralelas
 N : N° de conductores
 n : revoluciones por segundo
 Φ : flujo útil por polo

b) CUPLA MOTRIZ o TORQUE: C.-

Llamando respectivamente I_a la corriente de armadura, r la resistencia interna del motor (que en caso del motor serie, comprende la resistencia de armadura r_a y la del circuito de excitación r_m) se tiene:

$$U = E + r * I_a$$



Por otra parte, prescindiendo de las pérdidas en el fierro y las pérdidas mecánicas que tienen lugar en el inducido, la potencia mecánica útil en el eje del motor es igual a la eléctrica en el circuito del inducido, por lo que debe ser:

$$2\pi * n * C = E * I_a$$

O sea:

$$C = \frac{E * I_a}{2\pi * n}$$

En que, E se expresa en volts; I_a en amperes; n en revoluciones por segundo, C resulta expresado en joules/rad. Para expresarlo en kgm deberá dividirse por 9,81.

Sustituyendo E por su valor $p/a * n * N * \Phi$, y englobando en una única constante k los parámetros constitutivos de la máquina y la relativa a la selección de la unidad de medida, se puede poner:

$$C = k * \Phi * I_a$$

Es importante destacar de esta expresión de la cupla motriz, que ésta es independiente de la velocidad del motor, y resulta proporcional al flujo y a la corriente de armadura.

c) INTENSIDAD DE CORRIENTE: I_a

$$I_a = \frac{U - E}{r}$$

De esto resulta que, en un motor detenido, siendo $E = 0$, la corriente, si se conectara el motor a plena tensión de línea sin tomar ninguna precaución, tomaría valores peligrosos para la integridad del motor, siendo pequeñísimo.

Es necesario por tanto, para efectuar el arranque de reposo de un motor, insertar en serie a la armadura una resistencia de arranque para limitar la corriente absorbida, de modo que no se sobrepase la corriente máxima permitida al motor. La resistencia se excluye gradualmente a medida que crece la c.f.e.m con el aumento de la velocidad del motor.

d) VELOCIDAD: n

De la expresión de la c.f.e.m, y de la relación que liga U y E ; $E = k n \Phi$, $U = E + r I_a$, resulta:

$$n = \frac{U - r * I_a}{k \Phi}$$

Por tanto, en el caso que, como se verifica en la práctica, la caída de potencial interna de la máquina es despreciable frente a la tensión aplicada, se puede decir que la velocidad del motor es proporcional a la d.d.p. en las escobillas, e inversamente proporcional al flujo útil por polo.

e) REACCIÓN DE ARMADURA Y CONMUTACIÓN.

Dado que en motor, permaneciendo inalterable la dirección del campo inductor y de la corriente en la armadura, gira en sentido inverso respecto al funcionamiento como dinamo, los fenómenos de conmutación resultan invertidos, por lo que el campo de conmutación debe ser del mismo sentido del producido por el polo precedente en el sentido de rotación. Por tanto, para obtener una conmutación sin chispeadura deben desplazarse las escobilla hacia atrás en el sentido de rotación de la armadura respecto del plano neutro. Además resulta que los motores a c.c, a causa de la reacción de armadura, el flujo presenta una densidad mayor sobre los cuernos polares anteriores y menor sobre los posteriores en el sentido del movimiento. Dado que los polos auxiliares son excitados siempre de la misma corriente de armadura, al invertir el sentido de rotación del motor no debe ocurrir ninguna inversión de conexiones de los enrollados de los polos de conmutación.

f) RENDIMIENTO

Llamando I la corriente de línea, I_a a la de armadura, I_m a la del circuito de campo (para los motores shunt es: $I = I_a + I_m$), la potencia absorbida en el motor está dada por: $W_a = U * I$; la potencia electromagnética del inducido da: $W_e = E * I_a$ (en el caso de los motores en serie: $W_e = E * I = (U - r I) I$); la potencia útil W_u , que se puede aprovechar en el eje del motor, es igual a la potencia electromagnética menos las pérdidas en el fierro y las mecánicas (roce y ventilación).

$$\text{Potencia Mecánica desarrollada} = \text{Potencia Eléctrica absorbida} - \text{Pérdidas óhmicas}$$

Potencia Útil mecánica = Potencia Mecánica desarrollada - Pérdidas mecán. - Pérd. hierro

$$\text{Rendimiento Conversión} = \eta_c = \frac{\text{Potencia Mecánica Desarrollada}}{\text{Potencia Eléctrica Absorbida}}$$

$$= \frac{W_a - r * I_a^2}{W_a}$$

$$\text{Rend. Mecánico} = \eta_m = \frac{\text{Potenc. Útil Mecánica}}{\text{Potenc. Mecánica desarrollada}}$$

$$= \frac{\text{salida}}{\text{salida} + p_m + p_f}$$

$$\eta = \eta_c * \eta_m$$

3.- CARACTERÍSTICAS MOTOR CC EXCITADO EN SERIE

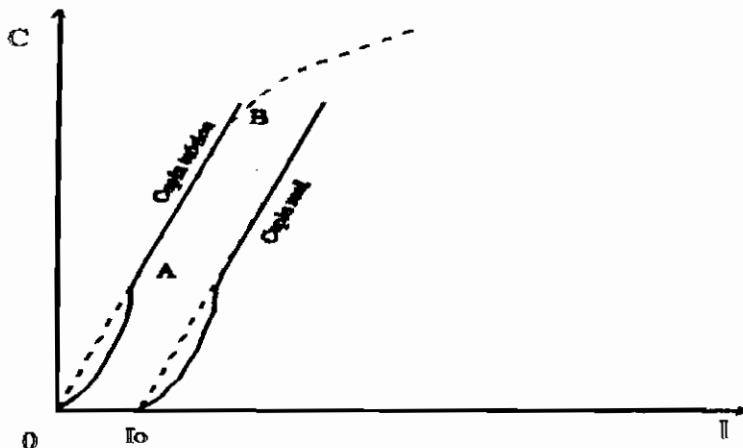
a) CARACTERÍSTICA MECÁNICA

Ha sido el motor más comúnmente empleado en la tracción ferroviaria, tanto eléctrica como diesel-eléctrica, como también en la tracción tranviaria y teleférica.

En los motores en serie, estando el circuito de excitación en serie al de la armadura, se encuentra que la corriente de excitación I_m es la misma de la armadura I_a , y de la total I .

En lo que respecta a la cupla es evidente que, hasta que el circuito magnético no se sature, el flujo Φ es proporcional a la corriente, y por lo tanto la característica electromagnética de la cupla C : $C = f(I)$ tiene una primera parte representando una parábola, siendo en este caso:

$$C = k' * \Phi * I = k'' * I^2$$



Alcanzando la saturación el circuito magnético, esto que en general se verifica después de un breve trazo, el flujo tiende a permanecer constante, y por lo tanto, la curva asume una forma rectilínea. Este segundo trazo de la

curva se empalma con el primero mediante un punto de inflexión, mientras la prolongación pasa por el origen de los ejes (Fig. 1).



Fig. 2.-

Con el aumento de la intensidad de corriente la curva se dobla hacia el eje de las abscisas, por efecto de la reacción de inducido y del flujo de dispersión.

En cuanto a la velocidad, es evidente que:

$$n = \frac{U - r \cdot I}{k_1 \cdot \Phi} = \frac{U - r \cdot I}{k_1 \cdot \Phi} =$$

$$n = \frac{U}{k_1 \cdot I} - \frac{r}{k_1}$$

Que representa la ecuación de una hipérbola equilátera, válida naturalmente mientras Φ se mantenga proporcional a I .

De allí, en el límite de proporcionalidad entre corriente y flujo, al aumentar la corriente el flujo primeramente crece más lentamente, y después permanece casi constante, la curva de la corriente se acerca al eje de las abscisas siguiendo una trayectoria sensiblemente lineal (Fig.2), hasta alcanzar el eje de las abscisas correspondiendo al valor $I_{máx}$ de la corriente para $n = 0$, o sea: $I_{máx} = U/r$

Que en la práctica no es prudente alcanzar para la buena conservación del motor.

Cuando la cupla resistente del motor disminuye, la velocidad aumenta rápidamente porque crece el numerador mientras que simultáneamente disminuye el

numerador. Si se descarga el motor, este tiende a adquirir velocidades peligrosas(motivo por el cual no se emplea en máquinas herramientas), a menos que las pérdidas que aumentan con la velocidad sean tales que limiten tal tendencia. Por tanto, la parte de la característica prácticamente utilizable está limitada un solo trecho, el AB.

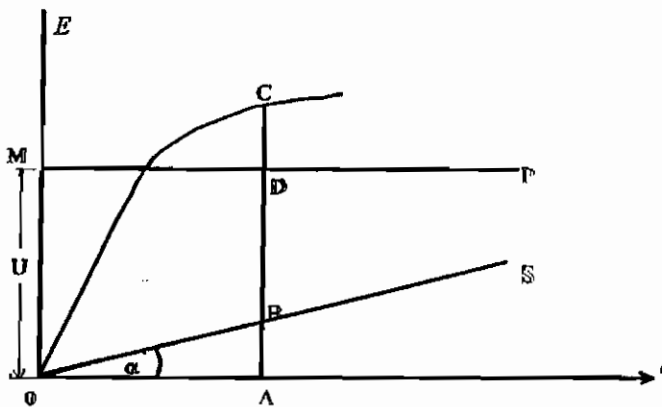


Fig. 3.-

Teniendo la característica magnética, que en la práctica se puede obtener haciendo funcionar la máquina como generador en vacío a

una velocidad dada: $E_{n_0} = f(I)$, es fácil trazar punto por punto la curva $n = f(I)$.

Sea en efecto (Fig. 3) E_{n_0} la característica en vacío correspondiente a la velocidad n_0 . Se traza la recta OS tal que sea $tg \alpha = r$ y MP paralela al eje de las abscisas con ordenada $OM = U$. Para cualquier valor de corriente $I = OA$ se tiene

$$E = U - r I = AD - AB = BD$$

También en el funcionamiento en vacío la f.e.m. E_{no} correspondiente a la corriente $I = OA$ está dada por AC , y en el funcionamiento como motor la c.f.e.m. E es proporcional a la velocidad correspondiente n , se tiene:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{BD}{AC} \quad n = n_0 * \frac{BD}{AC}$$

Repitiendo así la operación un conveniente número de veces resulta fácil trazar la curva.

La característica mecánica: $C = f(n)$, puede hallarse de las dos características electromagnéticas trazadas anteriormente.

A velocidad reducida el bajo valor de la c.f.e.m. causa la elevación de la corriente, y por consiguiente la cupla motriz asume valores elevados que van decreciendo a medida que la velocidad aumenta.

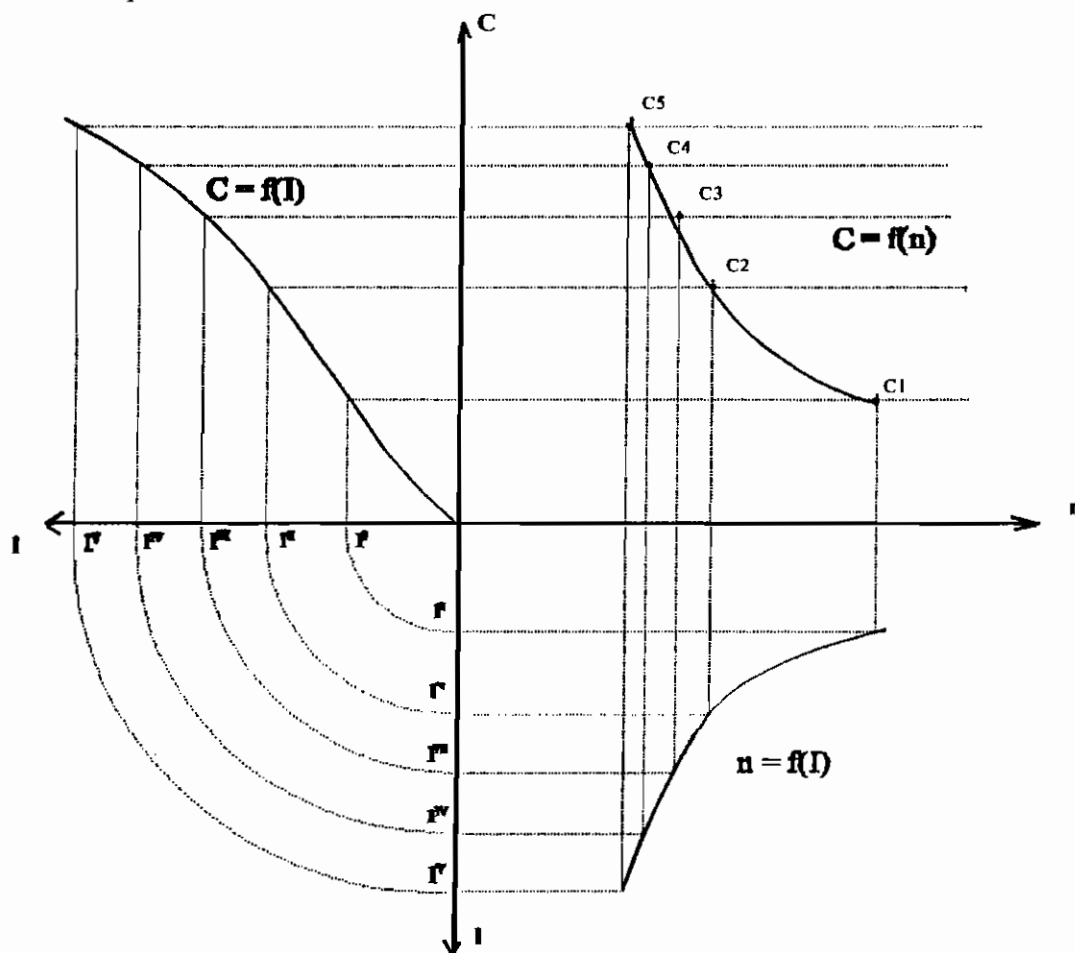


Fig. 4.-

Para trazar la curva se puede proceder del siguiente modo: Disponer como en la Fig. 4 las curvas de la cupla motriz y de la velocidad en función de la corriente I , para un punto I^1 relativo al valor OI^1 de la corriente se determina el punto correspondiente sobre la curva de la cupla motriz, de la cual se traza la paralela al eje de las abscisas. Se repite para los otros puntos proyectándolos en los $I^{II}, I^{III}, I^{IV}, \dots$ sobre el eje de las ordenadas en sentido negativo, los valores de las corrientes. De los correspondientes puntos sobre la curva $n =$

$f(I)$, se trazan las paralelas al eje de las ordenadas hasta encontrar las paralelas de las abscisas, determinando así los puntos C1, C2, C3, ..., que individualizan la curva buscada.

El rendimiento eléctrico está dado por:

$$\eta_e = \frac{E * I}{U * I} = \frac{E}{U} = \frac{U - r * I}{U} = 1 - \frac{r * I}{U}$$

en que se ve que este varía en función de la corriente absorbida según una ley lineal: la recta correspondiente corta el eje de las ordenadas en A (OA = 1), (Fig. 5), y con un coeficiente angular $\operatorname{tg} \alpha = -r/U$. También la potencia absorbida $W_a = V * I$, naturalmente varía linealmente con la corriente I.

El rendimiento total del motor η , relación entre la potencia mecánica útil y la potencia eléctrica absorbida, está dado por:

$$\eta = \frac{U * I - (r * I^2 + p_f + p_m)}{U * I}$$

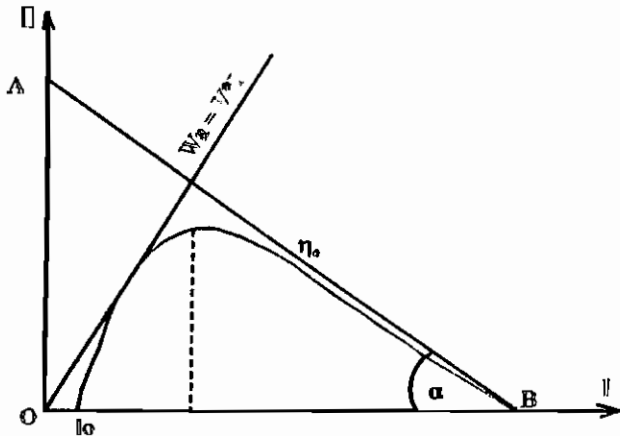


FIG. 5.-

$P_f = \text{pérdidas en el hierro}$
 $P_m = \text{pérdidas mecánicas}$

La potencia es nula con la corriente en vacío. Por tanto, la curva de η en función de I parte de cero correspondiente a un valor de corriente igual a I_0 y alcanza el valor máximo cuando la corriente toma el valor en que se verifica:

$$\frac{\partial \eta}{\partial I} = U - 2rI = 0$$

suponiendo que p_f y p_m puedan considerarse constantes, de donde:

$$I = \frac{U}{2r}$$

enseguida la curva decrece para acercarse a la curva del rendimiento teórico.

El máximo teórico de la potencia útil, suponiendo p_f y p_m despreciables, se tiene naturalmente con el valor de corriente $I_{\text{máx}}$, y por lo tanto está dado por:

$$W_{U \text{ máx}} = UI - rI^2 = \frac{U}{2r} - \frac{rU^2}{4r^2} = \frac{U^2}{2r} - \frac{U^2}{4r} = \frac{U^2}{4r}$$

Que corresponde a la mitad de la potencia absorbida:

$$W_u = UI = \frac{U^2}{2r}$$

En la práctica, aún en las peores condiciones de funcionamiento, con motores modernos, el rendimiento sobrepasa, y por mucho, el 50 %, alcanzando fácilmente el 95 – 98 % para un valor de la corriente inferior a $U/2r$ correspondiente al máximo rendimiento, pero próximo al máximo de corriente que el motor puede soportar.

b) FUNCIONAMIENTO CON RESISTENCIA EN SERIE

Es interesante para las aplicaciones prácticas estudiar el funcionamiento del motor con tensión reducida, como puede verificarse por efecto de una baja de la tensión de línea o de la inserción de resistencias en serie a la armadura, como es obligación hacer durante el arranque para limitar el valor de la corriente absorbida..

En este segundo caso, llamando R a la resistencia del reóstato de arranque, debe tenerse:

$$U = E + (r + R) * I$$

Permaneciendo iguales, la curva de funcionamiento en vacío de la máquina y la tensión de alimentación del motor U , veremos como varían las curvas características.

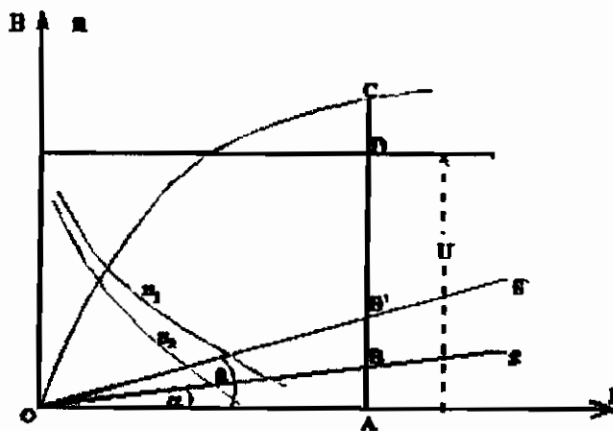


Fig. 6. -

Trazando las dos rectas OS y OS' (Fig. 6) tales que sean $\text{tg } \alpha = r$, y $\text{tg } \beta = r + R$, es evidente que para cualquier valor de la corriente $I = OA$ se tiene:

$$n_1 = \frac{U - rI}{k' \Phi} = \frac{BD}{k' \Phi}$$

$$n_2 = \frac{U - (r + R)I}{k' \Phi} = \frac{B'D}{k' \Phi}$$

Por lo que:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{B'D}{BD}$$

Por efecto de la inserción de resistencia en serie a la armadura, la velocidad del motor disminuye tanto más mientras más elevado sea el valor de la resistencia.

Es importante observar que, en la proximidad del origen, la razón $B'D/BD$ resulta cercana a la unidad, por lo tanto las dos curvas, como se observa en la figura, correspondientes a los valores límites de la corriente, se acercan la una a la otra.

En cuanto a la característica mecánica, que la cupla motriz es únicamente función de la corriente, está claro que la inserción de resistencia en serie a la armadura no modifica la característica del motor, sólo provee un desplazamiento de la curva de modo que a valores iguales de la cupla motriz, se verifican valores más bajos de velocidad respecto al funcionamiento en condiciones normales. Por efecto de la inserción de una resistencia, para un mismo valor de la intensidad de corriente, la tensión en las escobillas del motor, resulta más baja, de tal modo que igualmente la velocidad resulta más baja respecto a la relativa al funcionamiento del motor en condiciones normales.

Por lo tanto, las dos curvas relativas a las velocidades n_1 y n_2 inherentes al funcionamiento normal, y con resistencia incluida resultan dispuestas una con respecto a la otra como en la Fig. 7.

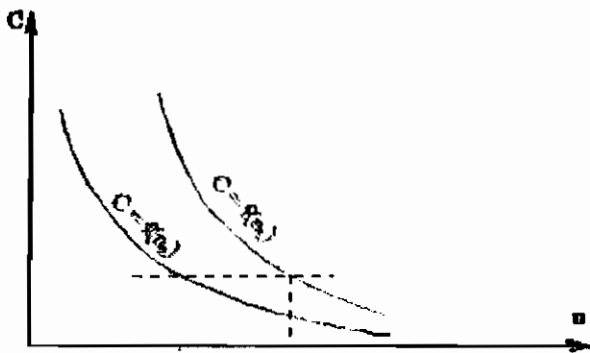


Fig. 7. -

Evidentemente, en el caso de disminución de la tensión de línea, que suponemos pasa de un valor U al valor menor U' , la curva se desarrolla de modo análogo. Para una intensidad de corriente dada el valor de la cupla motriz no varía y, despreciando la c.f.e.m. interna la velocidad disminuye en proporción de la baja de tensión, teniendo:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{U'}{U}$$

La característica mecánica también en este caso se desplaza contra el origen proporcionalmente a la baja de tensión de la línea.

En cuanto al rendimiento, con la variación de la velocidad de n_1 a n_2 , la potencia útil, permaneciendo inmutable la carga y por consiguiente la cupla, varía también éste en la misma razón de las velocidades, mientras la potencia absorbida, pasando la tensión en bornes del motor de U a U' , pasa de UI a $U'I$. Se tendrá:

$$\frac{\eta'}{\eta} = \frac{n_2}{U'} \div \frac{n_1}{U} = \frac{n_2}{n_1} * \frac{U}{U'} = \frac{U' - rI}{U - rI} * \frac{U}{U'}$$

Y entonces

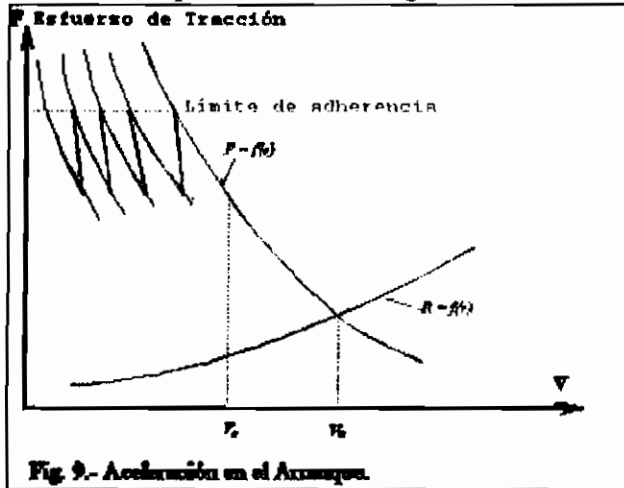
$$\eta' = \eta * \frac{1 - \frac{rI}{U}}{1 - \frac{rI}{U'}}$$

También el rendimiento disminuye con la tensión de alimentación, tanto más rápidamente cuanto mayor sea la carga.

En las locomotoras eléctricas tradicionales con alimentación a cc y motores serie, se emplean dos sistemas para controlar la corriente de partida, que como hemos visto puede ser bastante alta y peligrosa para la integridad del motor. Uno es la intercalación de una resistencia en serie variable que en la locomotora se denomina **resistencia de aceleración o de partida**, y el otro sistema es la combinación de motores en serie y paralelo, con lo cual se logra variar el voltaje que recibe cada motor.

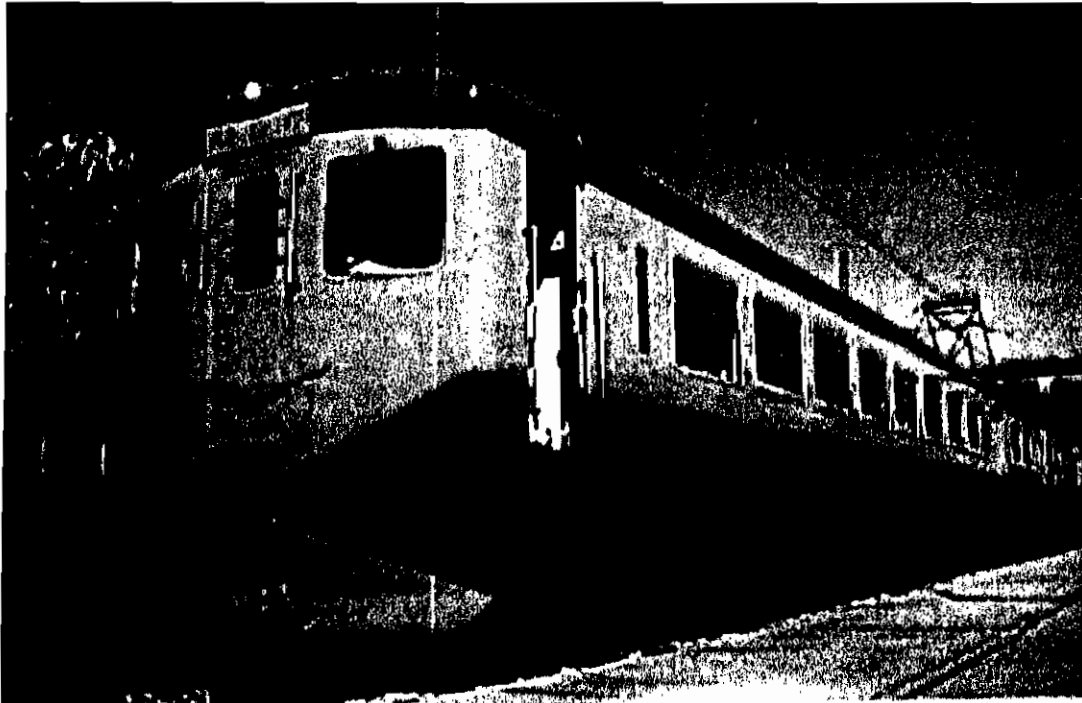
A medida que el motor aumenta su velocidad y crece la c.f.e.m., y el torque o esfuerzo de tracción se iguala a las fuerzas resistentes del tren, se van eliminando los sectores de la resistencia de aceleración con el cierre secuencial de contactores, hasta alcanzar un nuevo equilibrio. Cuando se elimina toda la resistencia de arranque, se aplica el voltaje de línea directamente a los motores. La velocidad permanece constante en el punto

donde el torque del motor se iguala a las fuerzas resistentes del tren, llamada **velocidad de equilibrio o marcha V_R** . (Fig. 9).



La acción de los contactores puede estar comandada por el propio maquinista con la manilla de aceleración en la cabina de comando, la cual mueve un tambor que efectúa el accionamiento de los contactores. Sin embargo, ha sido común el uso de un **relé de aceleración**, especialmente en los llamados **automotores eléctricos, o EMUs** (Electric Multiple Units) el cual actúa en base a la corriente que toman los motores. Cuando la corriente disminuye por efecto

de la c.f.e.m. a un valor determinado, actúa el relé de aceleración accionando un contactor que elimina un sector de la resistencia de arranque.



Automotor AEL de EFE.

c) SHUNTAJE DE CAMPO

Examinemos ahora los efectos de la **variación del campo inductor Φ** que se puede realizar ya sea shuntando el circuito de campo mediante una resistencia en derivación, o ya sea variando el número o reagrupamiento de las espiras del campo.

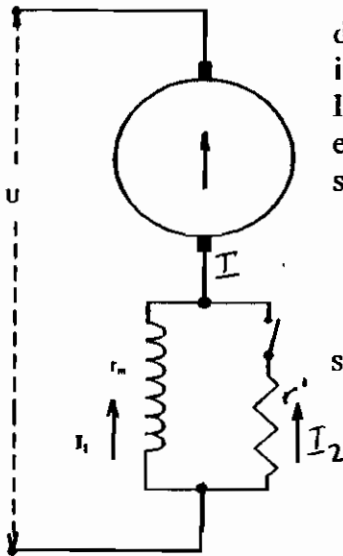


FIG. 8

En el primer caso, insertando en derivación al circuito de campo de resistencia r_m , un shunt de resistencia r' (Fig. 10), la intensidad de corriente I de la armadura se repartirá entre el campo I_1 y el shunt I_2 de modo que la corriente en las espiras de excitación se reduce de I a I_1 , por lo que se establecen las siguientes relaciones:

$$I = I_1 + I_2$$

$$r_m I_1 = r' I_2$$

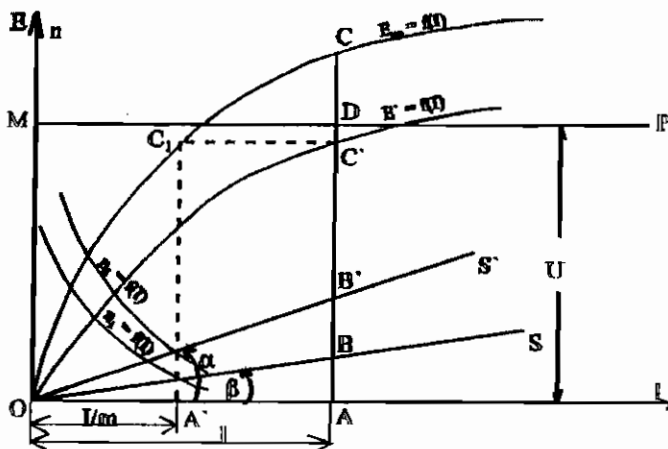
A campo debilitado, la corriente de excitación llega a ser también:

$$I_1 = I \frac{r'}{r' + r_m} = \frac{I}{m}$$

En que

$$m = \frac{r' + r_m}{r'}$$

Por efecto de la reducción de campo la velocidad del motor aumenta y, para trazar la característica de la velocidad $n = f(I)$ en la nueva condición de funcionamiento, se procede del modo siguiente:



Habiendo trazado (Fig. 11) la característica en vacío de la máquina a una cierta velocidad $E_{no} = f(I)$, se trazan las dos rectas OS y OS' tales que:

$$\text{tg } \alpha = r = r_o + r_m$$

$$\text{tg } \beta = r_1 = r_o + r_m \left(\frac{r'}{r' + r_m} \right)$$

Para trazar la característica en vacío relativa al funcionamiento a campo debilitado: $E' = f(I)$, tomando un cierto número de

puntos C sobre la primera curva, los correspondientes puntos C' de la segunda curva se determinan de este modo.

Para un valor cualquiera $I = OA$, se toma el valor $I/m = OA'$, y de A' se eleva la vertical hasta encontrar en C_1 la curva $E_{no} = f(I)$. Proyectando el punto C_1 hasta la vertical que pasa por A se haya el punto C' de la curva $E' = f(I)$ correspondiente a C , ya que la ordenada AC' mide la f.e.m. de la máquina durante el funcionamiento en vacío correspondiente al valor I de la corriente de armadura.

Tenemos así las dos curvas: $E_{no} = f(I)$ y $E' = f(I)$, cuyas ordenadas son proporcionales a los flujos Φ y Φ' ; trazando la paralela al eje de las abscisas con una ordenada igual a U , en correspondencia a un valor cualquiera de corriente $I = OA$ sabemos que BD y $B'D$ dan valores de c.f.e.m. correspondientes al funcionamiento inicial y luego al del shuntaje respectivamente.

Por lo tanto, llamando n_1 y n_2 a las velocidades relativas, y n_o a la velocidad relativa a la curva $E_{no} = f(I)$ de funcionamiento en vacío se tiene:

$$\frac{n_1}{n_o} = \frac{BD}{AC} \quad \text{y} \quad \frac{n_2}{n_o} = \frac{B'D}{AC'}$$

de lo que:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{B'D * AC}{BD * AC'}$$

La razón n_2/n_1 resulta por lo tanto mayor que la unidad, esto quiere decir que la velocidad aumenta en una razón fácil de calcular.

Repitiendo el mismo procedimiento para suficiente número de puntos, es posible trazar la característica de la velocidad del motor con campo debilitado.

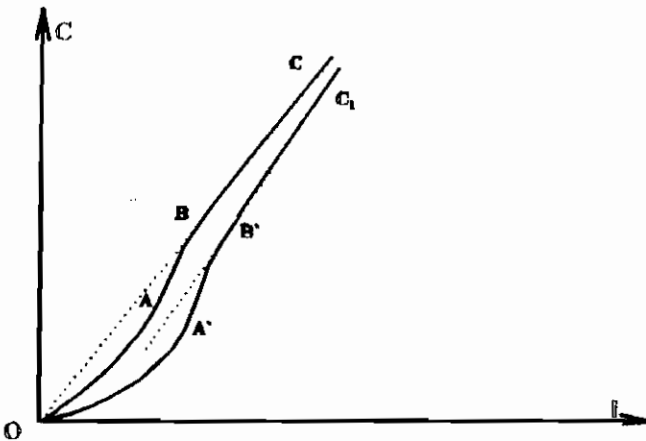


FIG. 12

Para trazar la característica de la cupla $C = f(I)$, basta observar que en los motores, si el campo está debilitado de modo que la corriente de excitación se reduce del valor I a pleno campo, al valor I/m , también el torque se reduce, a igual corriente de armadura, en la misma proporción. Por lo tanto (Fig. 12), las dos características, OC del motor a pleno campo y OC_1 a campo shuntado, se deduce la una de la otra mediante una proyección; más

precisamente el torque en los motores shuntados crece menos rápidamente, y la reducción del torque es tanto mayor cuando menor es el valor de la resistencia del Shunt.

Para los valores elevados de corriente, sobre todo en los motores que tienen un circuito magnético parcialmente saturado, las dos características en el trecho rectilíneo tienden a acercarse.

En lo que respecta a la característica mecánica, consideremos por un instante el funcionamiento con campo shuntado y él a pleno campo a una condición dada de régimen. Por efecto de la inserción del shunt a una velocidad dada, o sea a un valor dado de flujo, y por consiguiente de la corriente I_1 , es necesario que aumente la corriente I debiendo siempre ser: $I = I_1 + I_2$, lo que provoca un aumento del torque.

También en los motores a campo shuntado la característica mecánica resulta desplazada hacia arriba y a la derecha (Fig. 13), respecto a la de pleno campo. En cuanto a

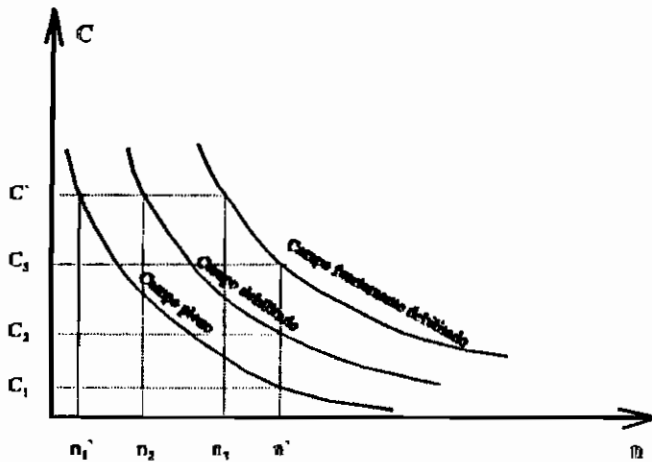


FIG. 13

igual velocidad, el motor desarrolla un mayor torque (y por lo tanto una mayor potencia) mientras que como se había visto anteriormente que, a igual intensidad de corriente total I absorbida, el motor desarrolla una mayor velocidad y un torque menor.

Volviendo a examinar cómo varía el rendimiento por efecto del debilitamiento del campo observamos que, para una corriente dada total I , la potencia absorbida es la misma, también el rendimiento η' del motor shuntado y η a pleno campo, despreciando las pérdidas

magnéticas y mecánicas, quedando entre ellos en la siguiente proporción;

$$\frac{\eta'}{\eta} = \frac{UI - r_1 I^2}{UI - rI^2} = \frac{1 - \frac{r_1 I}{U}}{1 - \frac{rI}{U}}$$

Y también es $r_1 < r$, se ve que el rendimiento de los motores a campo shuntado es ligeramente superior al del a pleno campo.

d) CAMPO SATURADO

Conviene por fin examinar cual es la influencia que tiene sobre la forma de las curvas características de los motores el grado de saturación del circuito magnético.

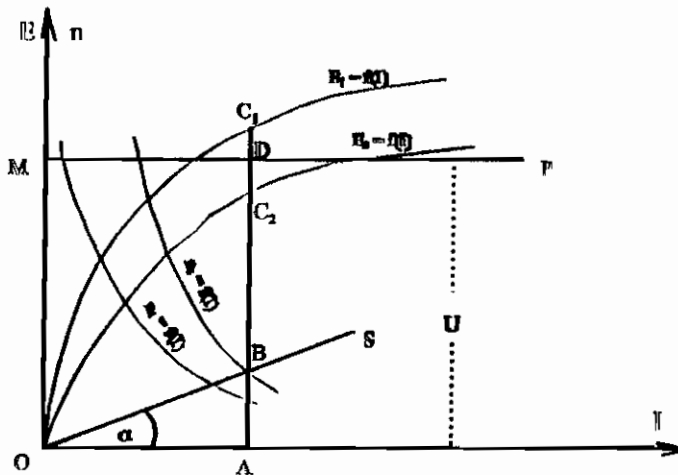


FIG. 14

En general en los motores de tracción se prefiere tener el circuito magnético no saturado, de modo que, variando el flujo en proporción de la corriente, el torque va rápidamente creciendo. Esta condición sirve evidentemente para conferirle al motor un elevado grado de estabilidad de marcha, ya que, a igualdad de variación de carga, y por lo tanto de velocidad, resulta mayor la variación de torque, como es necesario para

establecer la condición de funcionamiento normal.

Si tenemos dos motores idénticos, uno M_1 tiene el circuito magnético medianamente saturado, y el otro M_2 tiene el circuito poco magnetizado, a igualdad de corriente absorbida $I = OA$ se verifica (Fig. 14) que las dos curvas de funcionamiento en vacío $E_1 = f(I)$ y $E_2 = f(I)$, están una de otra de modo que la del motor M_1 que tiene el circuito magnético más fuertemente magnetizado, tiene la ordenada más alta.

Trazando como es costumbre, la recta MP paralela al eje de las abscisas y tiene por ordenada el valor del voltaje U , y la recta OS tal que $tg \alpha = r$, las velocidades de las dos máquinas a una corriente de valor $I = OA$, se tiene que:

$$n_1 = \frac{U - rI}{k \cdot \Phi_1} = \frac{BD}{AC_1} n_0$$

$$n_2 = \frac{U - rI}{k \cdot \Phi_2} = \frac{BD}{AC_2} n_0$$

De donde

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{AC_2}{AC_1}$$

Las velocidades están también entre ellas en razón inversa de las respectivas f.e.m. por lo que las curvas de las velocidades tienen posiciones inversas relativamente a las de las curvas de magnetización.

Con el aumento de las corrientes, los valores del flujo tienden a alcanzar el límite en la saturación del circuito, por lo que las dos curvas $n_1 = f(I)$ y $n_2 = f(I)$, tienden a confundirse.

En lo que respecta a los torques, que son proporcionales, para la corriente $I = OA$ a los productos $OA \cdot AC_1$ y $OA \cdot AC_2$, se ve que el torque resulta, como era de esperar, más enérgico para el motor M_1 que tiene el circuito mayormente magnetizado en el cual los aumentos del torque resultan más rápidamente que en el otro (Fig. 15).

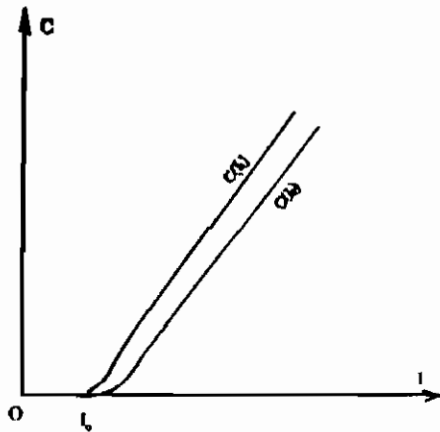


FIG. 15

utilizable de la curva corresponde a una variación de velocidad inferior, pero de torque mayor que en la de magnetización lenta.

La máquina con circuito parcialmente saturado tiene también un grado de estabilidad de marcha mayor que el de la máquina de magnetización lenta, además de poseer un torque más energético.

En conclusión, si consideramos ahora, como habíamos supuesto anteriormente, que los dos motores M1 y M2 tenían la misma potencia y absorben tanto en vacío como en carga la misma corriente, las variaciones de torque y velocidad, en función de la corriente, son más rápidas en la máquina de lenta saturación; mientras que las respectivas características mecánicas (Fig.16) resultan tales que, en el motor parcialmente saturado, la parte prácticamente

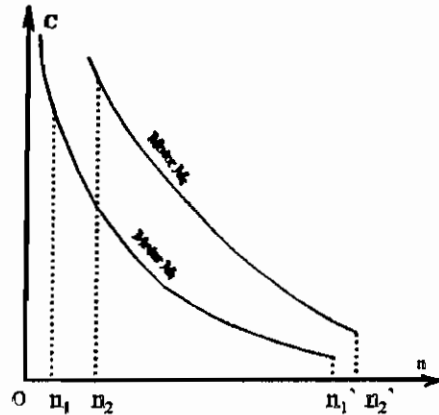


FIG. 16

e) ARRANQUE Y REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD

Para efectuar el arranque de los motores desde el reposo, como ya se ha dicho, debe insertarse en serie a la armadura una resistencia para limitar la corriente absorbida entre límites que no sean perjudiciales para la conservación de los motores mismos. Tal resistencia se va gradualmente excluyendo poco a poco, a medida que aumenta la

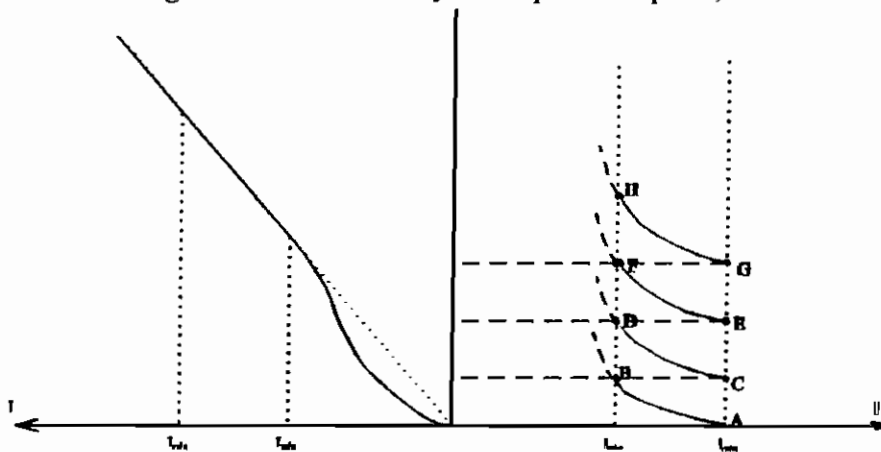


Fig. 17

velocidad, crece la c.f.e.m. para aumentar la tensión en bornes del motor y no dar lugar a inútiles disipaciones de energía.

En la mayor parte de los casos prácticos el arranque se efectúa de modo de mantener la corriente entre dos valores, mínimo y máximo: I_{min} e I_{max} bastantes vecinos entre ellos, por lo que las variaciones de torque (o del esfuerzo de tracción) resultan limitadas.

En el inicio se tiene naturalmente:

$$I_{\text{máx}} = \frac{U}{R_1}$$

En que $R_1 = r + R$

La primera característica electromecánica del motor $n = f(I)$ (Fig. 17) es por lo tanto utilizable sólo en el trecho AB. En el punto B se tiene evidentemente:

$$n_1 = \frac{U - R_1 I_{\text{mín}}}{k \Phi_{\text{mín}}}$$

Mientras en el punto C se tiene:

$$n_1 = \frac{U - R_2 I_{\text{máx}}}{k \Phi_{\text{máx}}}$$

Por lo que:

$$U - R_2 I_{\text{máx}} = \frac{U - R_1 I_{\text{mín}}}{k \Phi_{\text{mín}}} * k \Phi_{\text{máx}}$$

O sea

$$U - \frac{\Phi_{\text{máx}}}{\Phi_{\text{mín}}} (U - R_1 I_{\text{mín}}) = R_2 I_{\text{máx}} \quad (1)$$

y entonces:

$$\frac{U}{I_{\text{máx}}} - \frac{\Phi_{\text{máx}}}{\Phi_{\text{mín}}} \left(\frac{U}{I_{\text{máx}}} - R_1 \frac{I_{\text{mín}}}{I_{\text{máx}}} \right) = R_2$$

y dado que $R_1 = U/I_{\text{máx}}$ resulta:

$$R_2 = R_1 - \frac{\Phi_{\text{máx}}}{\Phi_{\text{mín}}} (R_1 - R_1 * a)$$

en que

$$a = \frac{I_{\text{mín}}}{I_{\text{máx}}}$$

Para calcular $\Phi_{\text{máx}}/\Phi_{\text{mín}}$, se puede proceder muy simplemente del modo siguiente:

¹ El valor $I_{\text{mín}}$ debe ser fijado de modo que el torque relativo, o esfuerzo de tracción, sea suficiente para efectuar el arranque en las condiciones deseadas.

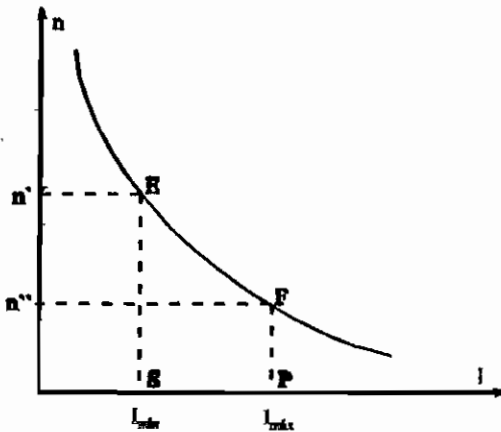


Fig. 18

Teniendo a disposición la característica mecánica $n = f(I)$, (Fig. 18), en correspondencia de los dos valores $OS = I_{\min}$ y $OP = I_{\max}$, se miden las ordenadas ES y FP que dan las velocidades relativas n' y n'' y encontrando ahí la razón buscada.

En efecto:

$$n' = \frac{U - rI_{\min}}{k' * \Phi_{\min}} \qquad n'' = \frac{U - rI_{\max}}{k' * \Phi_{\max}}$$

De lo que:

$$\frac{n'}{n''} = \frac{\Phi_{\max}}{\Phi_{\min}} * \frac{U - rI_{\min}}{U - rI_{\max}}$$

O sea:

$$\frac{\Phi_{\max}}{\Phi_{\min}} = \frac{n'}{n''} * \frac{U - rI_{\max}}{U - rI_{\min}}$$

Para la regulación de los motores, en la práctica se trata de mantener o la velocidad o el torque entre límites bastantes cercanos². En el primer caso (Fig. 19), siendo la curva (1) la característica mecánica del motor, como se notó, aumentando la cupla resistente, el motor tiende a relajarse. Para llevar la velocidad a un valor comprendido entre n_1 y n_2 es necesario pasar a la curva característica (3) de la cual es utilizable el trecho FE. Por el contrario, si la cupla resistente disminuye y el motor tiende a acelerarse, es necesario pasar a una curva característica (2) más baja, de la que es utilizable el trecho CD, esto se obtiene reduciendo, mediante un reóstato, la tensión aplicada en bornes del motor.

En el caso que la regulación deba hacerse de manera tal de mantener la cupla motriz entre dos valores C_1 y C_2 , se procede al contrario del siguiente modo (Fig. 20):

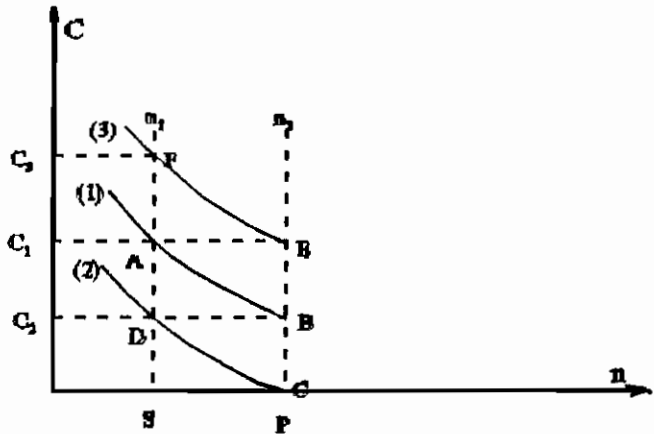


Fig. 19

² Como ya dijimos en el primer caso debe shuntarse el inductor, en el segundo caso reducir la tensión en borne, del motor.

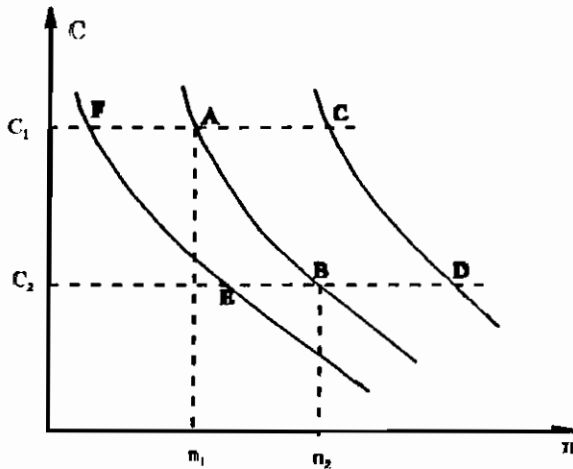


Fig. 20

Queriendo que la velocidad aumente manteniendo el torque en valores próximos $C_1 \div C_2$ es necesario pasar de la curva (1) a la curva (2), utilizando el trazo DC; mientras que si se quiere que la velocidad disminuya, debe pasarse a la curva (3), utilizando el trecho EF. Igual que en el caso precedente se procede variando el flujo inductor insertando un reóstato.

En resguardo de la tracción, estando los motrices equipados generalmente con una o más parejas de motores³, el método de regulación que más frecuentemente se recurre consiste en la

inserción de los motores en serie, o serie-paralelo, previo a dejarlos conectados a la tensión plena de línea.

Evidentemente, siendo sólo dos motores, la inserción de ellos primero en serie y después en paralelo, equivale a hacerlos funcionar primero a una tensión $U/2$ y después a la tensión U .

La posibilidad de efectuar el arranque mediante la inserción primero en serie y después en paralelo tiene gran importancia en lo que respecta al ejercicio, especialmente si se trata de servicio local, suburbano, o urbano, en los cuales las detenciones son muy frecuentes, por lo que la energía disipada durante los arranques resulta inferior a la correspondiente si se efectuara el arranque insertando los motores directamente en paralelo.

En efecto, suponiendo que el motriz esté equipado con dos motores, si se quiere efectuar el arranque con esfuerzo de tracción constante (lo que quiere decir aceleración constante y velocidad creciendo linealmente), en el caso de arranque en serie y paralelo, cada motor está alimentado a la mitad de la tensión de línea para una parte de la duración de arranque, y a plena tensión para la otra parte.

La energía absorbida por cada motor durante todo el arranque está dada por la suma (Fig. 21) de las áreas de los dos rectángulos ODEM + MFAP, y la energía entregada por cada motor está dada por el área del triángulo OBP; por lo tanto el rendimiento está dado por:

$$\eta = \frac{\text{área}OBP}{\text{área}ODEFAP}$$

³ Las locomotoras están dotadas con 4, 6 u 8 motores de tracción, siendo las de 4 y 6 las más comunes. Cuando de inicia la marcha todos los motores se conectan en serie entre ellos, después se pasa a una o dos etapas de conexiones serie-paralelo, y finalmente todos en paralelo.

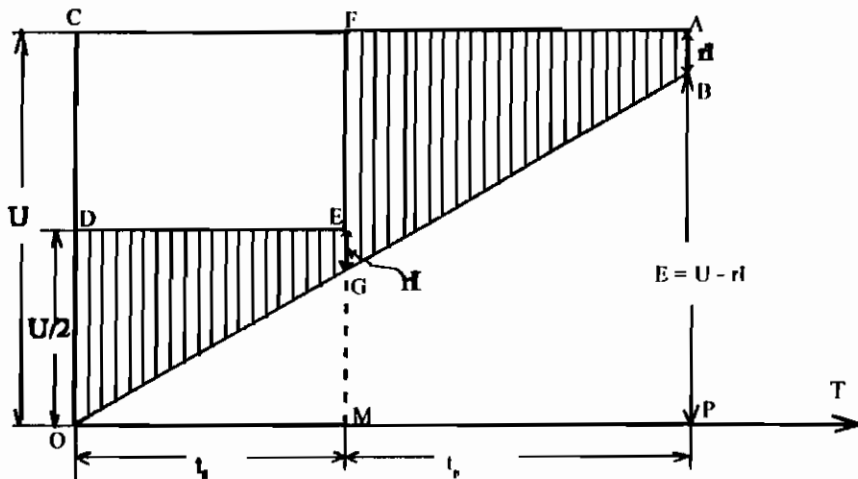


Fig. 21

Por el contrario haciendo el arranque con la inserción directa en paralelo de los dos motores (y preseindiendo de la consideración que la sección de la resistencia de arranque debe ser proporcionada para una corriente doble) mientras la energía entregada por cada motor debe ser la misma, la absorbida de la línea, siendo U el valor de la tensión durante todo el arranque, está medida por el área del rectángulo OAP que es mayor que la suma de los dos rectángulos del caso anterior.

De este modo, independientemente de la energía disipada en el reóstato, el arranque serie y paralelo respecto del con inserción directa en paralelo corresponde a un arranque de los motores con rendimiento más elevado.

En la Fig. 22 se ilustra un circuito de potencia muy simple de control de dos motores de tracción. La mayoría de las locomotoras y automotores emplean 4, 6 u 8 motores. El rango de control se mejora cambiando las conexiones de los motores a medida que el tren acelera. Este sistema se conoce como "control serie-paralelo".

En la Fig. 23, muestra el principio del control serie-paralelo. Hay tres etapas, "serie", "transición" y "paralelo", que operan en ese orden. Las conexiones de cambian automáticamente cuando el tren acelera. En la partida, los motores están en serie entre sí y con toda la resistencia de arranque. La resistencia se va eliminando por etapas y el tren acelera completamente en "serie" hasta que se elimine toda la resistencia. El tren en esta etapa llega a una velocidad de 30 km/h aproximadamente.

Si se requiere más velocidad, el circuito de transición conecta las dos patas del circuito serie. Inmediatamente de hecho esto, las dos conexiones serie se abren y se inserta de nuevo la resistencia en cada circuito motor. Las resistencias se van eliminando por etapas hasta eliminarlas completamente. Los motores corren ahora "completamente en paralelo" y la velocidad del tren alcanza la de régimen.

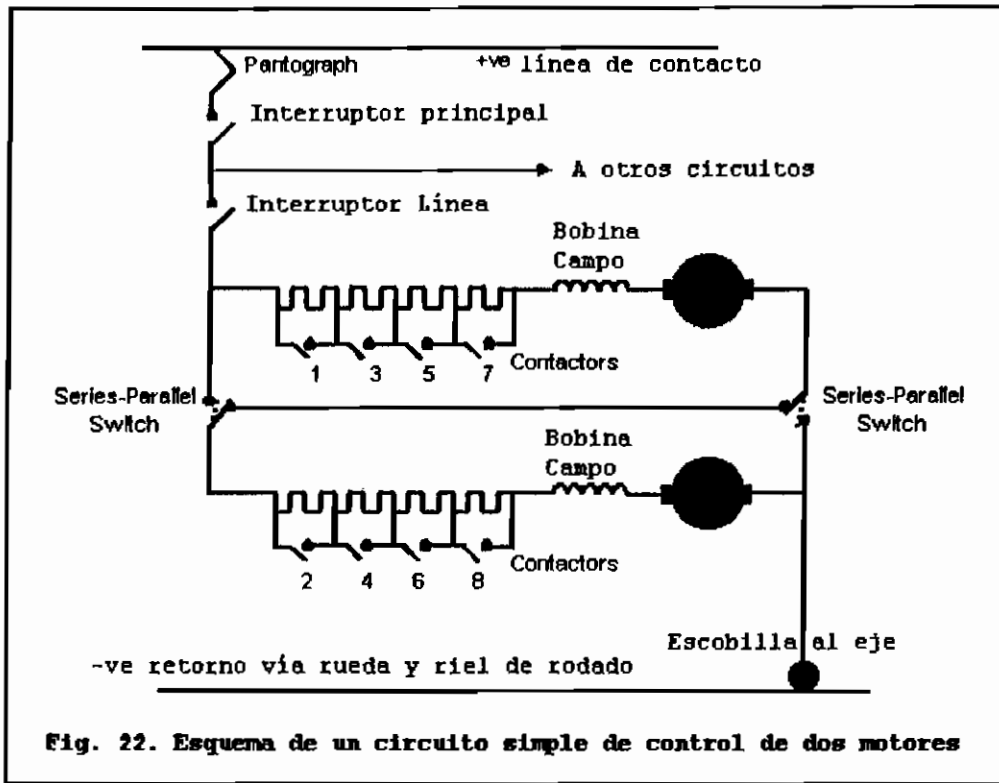


Fig. 22. Esquema de un circuito simple de control de dos motores

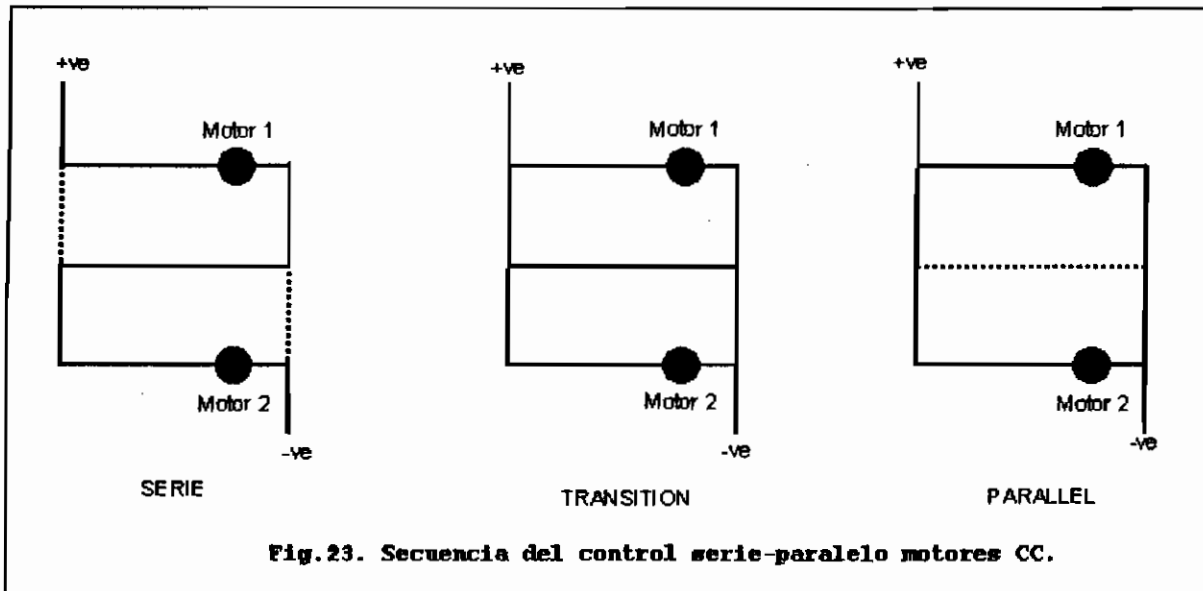


Fig. 23. Secuencia del control serie-paralelo motores CC.

4.- FRENADO ELÉCTRICO EN SISTEMAS DE TRACCIÓN CC.

En los equipos motrices eléctricos existe la posibilidad de ejercer un esfuerzo frenante por medio de la energía generada en los motores de tracción, mediante oportunas accionamientos en el circuito de fuerza.

En la tracción a cc se adoptan dos tipos de frenado eléctrico: reostático y en recuperación de energía o regeneración.

FRENADO REOSTÁTICO

En el frenado reostático se sacan los motores de la línea, se hacen trabajar como generadores de cc, conectándolos a través de resistencias en las cuales se disipa la energía generada en el inducido de los motores. En los motores tipo serie para evitar la desexcitación deben invertirse las conexiones del campo con la armadura. Por lo tanto las diversas operaciones deben hacerse en la siguiente secuencia: desconexión del motor de la línea; inversión de las conexiones campo-armadura; inclusión del circuito de resistencias, constituidas generalmente del mismo reóstato de arranque, donde este es suficiente.

En cuanto a los valores a asignarse al reóstato es evidente que este depende de la corriente que se intenta hacer circular en el circuito, corriente que, como en el funcionamiento en tracción, determina el esfuerzo que el motriz puede ejercer, que en este caso es esfuerzo frenante.

Puesto que no se podría superar el valor de la corriente al arranque del funcionamiento como motor $I_{m\acute{a}x}$, se deberá tener: $E = I_{m\acute{a}x} (R + r)$, mientras que en funcionamiento como motor se tenía: $U = I_{m\acute{a}x} (R + r)$; y puesto que E es menor que U , se ve que el mismo reóstato de arranque es, en cuanto a valor óhmico, suficiente también para el frenado reostático.

El reóstato deberá naturalmente estar dimensionado de modo que el desprendimiento de calor en el tiempo tenga lugar de modo de evitar aumentos de temperatura peligrosos para la buena conservación de las parrillas y demás partes, esto depende del valor, duración y frecuencia del frenado. Por otra parte, el efecto frenante, como ya se había señalado, depende de la intensidad de la corriente, y a fin de que al disminuir la velocidad del motriz, y por consiguiente de E , se puede mantener un eficiente esfuerzo frenante excluyendo el reóstato gradualmente.

Queriendo por ejemplo mantener un esfuerzo frenante y por consiguiente una corriente I constante, el valor de la resistencia R insertada en el circuito debe variar proporcionalmente al número de revoluciones n de la armadura, y puesto que $E = k n \Phi$, debe ser $k n \Phi = (R + r) I$, en que r se puede considerar constante, y Φ es también constante como lo es la corriente I .

Para determinar los valores que la resistencia R insertada en el circuito debe asumir al variar la velocidad de rotación del inducido n , procedemos de modo análogo al seguido en el cálculo de los valores de resistencia de las diversas secciones del reóstato de arranque.

Como habíamos observado, para mantener un valor dado de la corriente en el circuito, al disminuir la velocidad debe también disminuir la resistencia insertada. Suponiendo que despreciamos la resistencia interna del motor, se pone sobre el eje negativo

de las abscisas (Fig. 24) los valores de la resistencia y sobre el eje de las ordenadas los de la velocidad, las rectas de tal cuadrante nacidas desde el origen representan las curvas de funcionamiento de los motores operados como generadores a intensidad de corriente

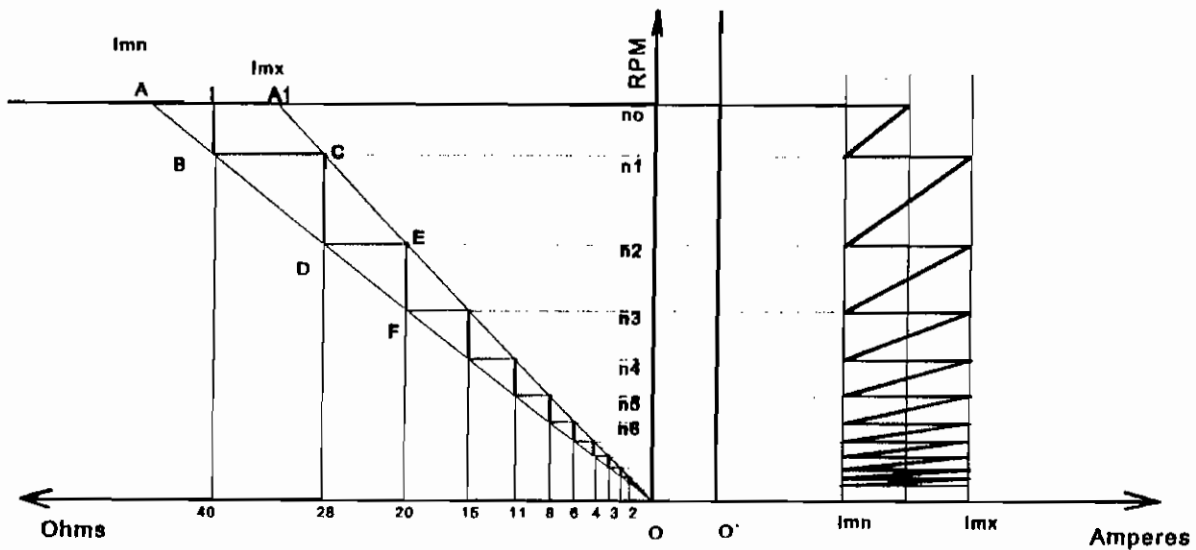


Fig. 24.

constante.

Por lo tanto, partiendo del valor n_0 de la velocidad al inicio del frenado, trazando las rectas $0 - I_{m\acute{a}x}$ y $0 - I_{m\acute{i}n}$, correspondientes a los valores prefijados entre los cuales se desea mantener la corriente, $0 - I$ media entre $I_{m\acute{a}x}$ e $I_{m\acute{i}n}$, a partir del punto I se traza la vertical hasta encontrar en B la recta OA, correspondiente al valor $I_{m\acute{i}n}$. De B se traza la horizontal hasta encontrar en C la recta OA_1 correspondiente al valor $0 - I_{m\acute{a}x}$ de la corriente. Y así se sigue trazando, siempre limitándose al espacio comprendido entre las rectas OA y OA_1 , un trazo vertical y otro horizontal, hasta determinar una escala que permita encontrar los valores de las resistencias atribuidas a las diversas secciones del reóstato. En éste está comprendido también el valor de la resistencia interna del motor; por tanto, para tenerlo en cuenta, debe desplazarse el punto O a O' distante de éste, hacia la derecha en r.

Conocidos de este modo los valores a asignarse a las resistencias a insertar en el circuito a fin de que, pasando de la velocidad n_0 a n_1, n_2, n_3 , etc., la corriente se mantenga entre los límites fijados $I_{m\acute{a}x}$ e $I_{m\acute{i}n}$, en correspondencia a cada uno de los valores de resistencia, el valor de la velocidad en función de la corriente, como se representa a la derecha de la Figura. La parte del diagrama que interesa en la práctica es el que está comprendido entre las dos paralelas al eje de las ordenadas conducidas para los valores de la corriente correspondientes a $I_{m\acute{i}n}$ e $I_{m\acute{a}x}$, que muestran como varía la intensidad de corriente, y por consiguiente el esfuerzo frenante entre los límites fijados, mientras la velocidad del valor inicial n_0 desciende hasta un cierto valor que no coincide con el cero porque, después de un cierto valor de la velocidad, la f.e.m. es tan baja que el frenado eléctrico pierde eficacia, y para detener el motriz debe recurrirse al frenado mecánico.

El procedimiento, se había visto sustancialmente es análogo al seguido para la fase de arranque. El valor inicial de la resistencia en la fase de frenado debe sin embargo ser más elevado que en tracción para evitar que se produzcan tensiones peligrosas. En

frenado en efecto, si el motriz acelera como puede verificarse en un descenso, no existe límite superior a la tensión que pueda generarse.

En el caso de motrices equipados con varios motores, como es la costumbre, es evidente que, también en la fase de frenado reostático se pueda recurrir a las diversas combinaciones de serie, serie-paralelo y paralelo de los motores. Los intervalos de

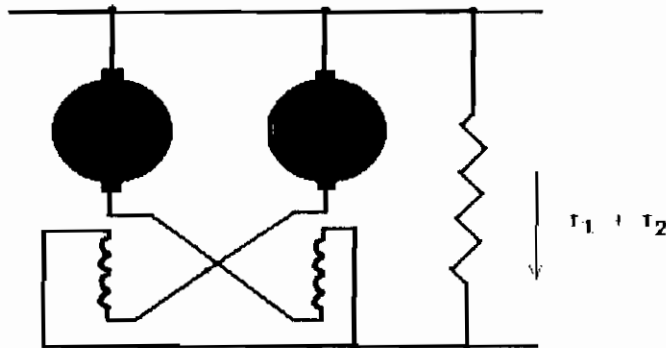


Fig. 25

velocidad de las diversas combinaciones son casi idénticos a las condiciones de marcha.

Se observa que en caso de inserción en paralelo de dos motores excitados en serie y funcionando como generadores sobre el mismo reóstato, un desequilibrio entre las f.e.m. de las dos máquinas, debe originar naturalmente una corriente de circulación que exaltará el fenómeno hasta conseguir la desexcitación completa de la máquina que tiene la f.e.m. más débil en la partida, y por consiguiente al corto circuito entre las dos máquinas.

El inconveniente se puede evitar adoptando para la excitación de las dos máquinas, por ejemplo, el esquema de la Fig. 25, mediante el cual los eventuales desequilibrios de las f.e.ms. son compensados por las mismas corrientes de circulación.

FRENADO EN CORTO CIRCUITO

El frenado en corto circuito es un caso particular del frenado reostático, en cuanto que este actúa incluyendo primero una resistencia, para después de un tiempo excluirla completamente. La inserción de la resistencia tiene como única función limitar notables aumentos de corriente.

Naturalmente la resistencia a insertar debe ser oportunamente dimensionada porque, debiendo limitar la corriente inicial, debe ser tal de conseguir el pronto inicio de la acción frenante; por consiguiente debe ser ligeramente inferior a la correspondiente para la velocidad del motriz al inicio del frenado, en un normal frenado reostático, esto puede causar un contragolpe por la brusca entrada en acción del freno.

El freno en corto circuito goza de la ventaja de ser, como el reostático, completamente independiente de la línea de contacto; sin embargo, no siendo regulable puede provocar debilitamiento del motriz por el continuo encallamiento de las ruedas; y por

tanto, cuando no sea posible contar con un valor alto del coeficiente de adherencia, a un enérgico frenado en corto circuito es preferible un progresivo frenado reostático, tanto más enérgico cuanto mayor sea el peso frenado.

FRENADO EN REGENERACIÓN

El frenado en recuperación de energía o regeneración, como se la conoce, se obtiene haciendo funcionar los motores de tracción, como en el caso anterior, como generadores, pero manteniéndolos insertados a la línea, de modo de convertir una parte de la energía mecánica, disponible por efecto de una pendiente, o de la inercia del tren, en energía eléctrica; siendo ésta, a través de la línea, utilizada por otros trenes que la absorban, o puede enviarse a las subestaciones, donde se disipa en reóstatos o se transfiere a la red primaria de alta tensión donde es utilizada.

Conviene mencionar aquí, que en el caso de empleo de tracción a c.c con subestaciones equipadas con rectificadores de mercurio o silicio, el problema más complejo de resolver consiste en realizar el paso inverso de la energía de la línea de contacto a la línea primaria. Se puede hacer pero se requiere equipamiento especialmente diseñado.

En el caso los motores excitados en serie, la inversión del sentido de corriente en la fase de recuperación trae como consecuencia la desexcitación de los motores, y por consiguiente el anulamiento de la cupla electromagnética, donde no se proceda a disponer de modo conveniente el circuito de fuerza del motor en el momento que el motriz inicia la marcha en descenso sobre un desnivel, para el cual la componente paralela de la gravedad supera la resistencia al movimiento del convoy.

Para efectuar la recuperación de energía en motrices con motores serie se recurre a transformar la excitación a independiente, o menos comúnmente, a compound o shunt⁽⁴⁾.

Por otra parte la limitada resistencia del circuito externo hace que una variación de tensión en la línea, también de extensión limitada, tiene como consecuencia una fuerte variación en la corriente recuperada, y por consiguiente del esfuerzo frenante. De aquí la necesidad de insertar en serie con la armadura del motor una resistencia llamada *estabilizadora*, dispuesta para conferir un valor suficiente a la resistencia externa para que las variaciones de la corriente derivadas de los desequilibrios entre la tensión de línea y tensión generada sean menos violentas.

Además hay que tener presente que el circuito de campo tiene una constante de tiempo mucho más elevada que la del circuito de la armadura, por lo que en los períodos de régimen transitorio las variaciones de tensión y de corriente repercuten de manera diferente en los dos circuitos; esto puede tener consecuencias de importancia en relación a la conmutación, no existiendo relación entre corriente conmutada y campo de conmutación.

Los diversos esquemas de circuitos propuestos hasta ahora han tenido aplicación limitada: todos los sistemas han adoptado usar la transformación durante la marcha en regeneración del circuito de campo con alimentación independiente mediante un dínamo a propósito (generalmente el mismo usado para otros servicios auxiliares) o

⁴ Evidentemente, conectándolo en derivación bajo la plena tensión de línea las espiras del campo del motor serie, debiendo los amperes-vuelta permanecer del mismo orden de magnitud al utilizado en funcionamiento como motor, debe emplearse un reóstato adaptado, el que resulta por lo tanto gravoso y en el cual se disipa una considerable cantidad de energía; esto tiene como consecuencia un rendimiento tanto más bajo mientras menor sea la recuperación en frente de este gasto.

adoptando también la operación de una de los motores de tracción como un generador para la corriente de excitación ⁽⁵⁾.

Un esquema que ha tenido muchas aplicaciones es el representado en la Fig. 26 diseñado por la casa Westinghouse. En la marcha en regeneración el circuito de excitación de los motores se alimenta de un generador (*excitatriz*) independiente. El circuito tiene en común con el principal una resistencia R , que se designa como *resistencia estabilizadora*.

El funcionamiento autoregulado del circuito está asegurado por el hecho que, variando la tensión de la línea, la resistencia estabilizadora interviene produciendo una acción en el sentido contrario a la corriente de excitación del motor funcionando como generador.

En efecto llamando e a la tensión e i la corriente generada por el dínamo excitatriz D; I la corriente regenerada y R' la resistencia de campo del motor, se tiene:

$$e = R_s * (I + i) + R' i$$

Al crecer la corriente regenerada I , disminuye la corriente de excitación i , y por consiguiente la f.e.m. generada por el motor funcionando como generador, esto hace retornar la I al valor normal.

El sistema tiene también estabilidad mecánica porque, al crecer la corriente regenerada I , aumenta el valor de la cupla o torque frenante; y esto mayormente cuanto más rápidamente varía la i al variar la tensión de línea, dado que la cupla o torque depende de I y del flujo, y por consiguiente de i hasta que el circuito no se sature⁽⁶⁾.

Si ocurriera por lo tanto que durante la regeneración la máquina trabajase con el circuito magnético cercano a la saturación: esto es posible sólo hasta cierto punto, ya que, si es

verdad que la energía empeñada en la regeneración es normalmente inferior a la misma alcanzada en la marcha de tracción, y también es verdad que, por razones de conmutación no se puede alterar de modo notable el valor de la corriente.

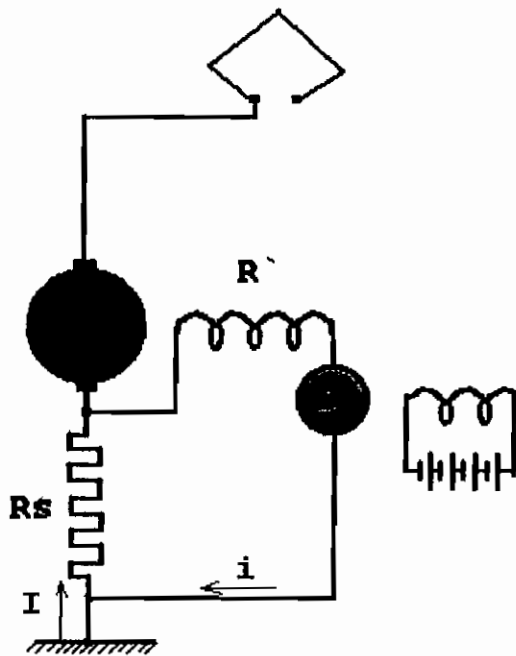


Fig. 26.-

⁵ El dínamo puede ser comandado o de un motor alimentado de la tensión de línea o también, para hacerlo independiente de la existencia o no de tensión de línea, de uno de los ejes de la locomotora. En este segundo caso, si se debe proceder a la alimentación de los campos de más motores, el dínamo puede asumir dimensiones molestas por la notable intensidad de corriente alcanzada también a bajas velocidades de la locomotora.

⁶ Para reducir la potencia del dínamo destinado a proveer la corriente de excitación se puede hacer de modo que esta última se provea, en cierta medida, por cierta parte de la misma corriente de regeneración.

El sistema de regeneración con excitación separada presenta la ventaja de utilizar el esfuerzo frenante de los motores de tracción, todos utilizados como generadores: pudiendo por consiguiente utilizar todas las combinaciones de motores de la marcha de tracción, a diferencia de los sistemas que emplean uno de los motores de tracción como excitatriz. En este caso no puede adoptarse más que la disposición en serie, por lo que el frenado a regeneración sólo se adoptaría a bajas velocidades,

La solución con excitatriz separada complica algo el equipamiento de la máquina, el que resulta más costoso e incómodo.

En el esquema de la Fig. 27 se propone un circuito basado en el concepto de operar la estabilización no directamente a través del circuito de excitación del motor, sino a través del circuito de campo de la excitatriz, en la cual la corriente es más débil y por consiguiente la sensibilidad mayor.

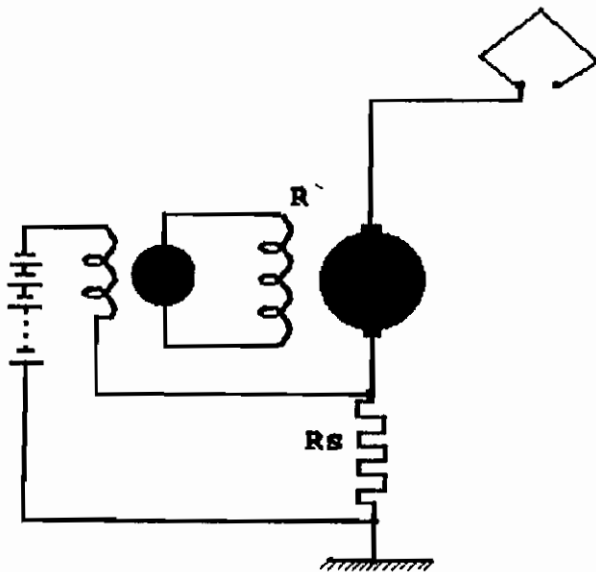


Fig. 27.-

La recuperación de energía tiene dos notables ventajas:

(a) Confiere al ejercicio un mayor grado de seguridad en la marcha del convoy, esto reviste una particular importancia en el caso de trenes pesados y de largo recorrido en pendiente en el sentido de descenso.

(b) Permite un notable ahorro de zapatas, llantas y de riel por el menor empleo del freno mecánico y consecuentemente menor producción de polvo metálico, el que depositado en el equipo eléctrico de las locomotoras, da lugar a inconvenientes tal vez graves.

A este respecto precisamos que la experiencia adquirida en el ejercicio de líneas de montaña permite afirmar que la eficacia de la regeneración está limitada, para una pendiente y velocidad dada, a un peso de tren no superior al 10 - 20 % del peso que la misma locomotora puede traccionar a la misma velocidad en el sentido de subida.

Naturalmente la seguridad de marcha del tren debe siempre asegurarse por el freno mecánico, para garantizar, ya sea contra eventuales caídas de tensión de la línea durante la marcha en regeneración, ya sea para el caso de pesos superiores al que se puede garantizar el frenado en regeneración.

La regeneración hace más complejo y costoso el equipamiento eléctrico de las locomotoras, y exige del maquinista una mucho mayor pericia. Las variaciones de tensión y de pendiente exigen la rápida y precisa maniobra para disponer las conexiones y la regulación del equipo.

En conclusión, salvo que en la práctica el tráfico sobre la línea y las pendientes sean importantes, la utilización del frenado en regeneración puede ser, desde el punto de

vista del comportamiento eléctrico y de la operación de manejo seguro, resultar poco o nada ventajoso, siendo preferible y más seguro el frenado eléctrico reostático.

5. LOCOMOTORAS MODERNAS.- La Electrónica de Potencia en la Tracción.

En este Subcapítulo daremos un vistazo muy resumido de los mejoramientos que se han logrado en la Tracción Eléctrica en las últimas décadas, gracias a los avances espectaculares de la electrónica de potencia.

DIFERENCIAS ENTRE CA Y CC.

Para entender los principios de los sistemas de control de potencia de tracción modernos, es bueno recordar la base de los circuitos CA y CC. CC es corriente continua - que viaja en una sola dirección en un conductor. CA es corriente alterna llamada así porque cambia de dirección, fluyendo primero hacia una dirección y después a la otra en un conductor. El número de cambios por segundo es llamado la frecuencia y se mide en Hertz (Hz) o ciclos por segundo como se decía antiguamente. Más abajo se muestra una

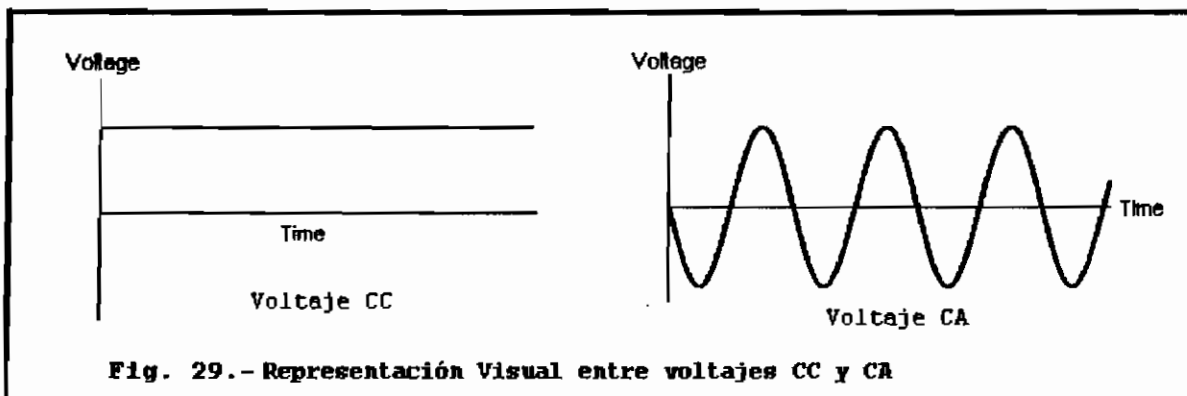


Fig. 29.- Representación Visual entre voltajes CC y CA

representación gráfica de los dos tipos de corriente.

Desde el punto de vista de la transmisión, la alimentación con CA es mejor que con CC porque puede distribuirse a mayor voltaje con lo que el tamaño de los conductores es menor, mientras que con CC se necesitan conductores muchos más gruesos. En el suministro con CC se requieren subestaciones con más equipamiento y más cercana entre sí, como de alrededor de 8 a 1 en el promedio de ferrocarriles. Hay varios otros aspectos que analizar, pero en general la tendencia actual es la alimentación de los trenes con CA:

Hace más cien años atrás, con la introducción de la tracción eléctrica en los ferrocarriles, la regla era que la CA se usaba para distancias largas y la CC para las cortas, suburbanos y metros. La CC ha llegado hasta los 3000 volts, mientras que la CA usa voltajes de 15.000 - 50.000 volts.

Hasta no hace mucho, se preferían los motores de tracción de CC para todos los ferrocarriles por sus especiales características que los hacen apropiados al trabajo ferroviario, sin embargo, con la electrónica de potencia se hace cada más frecuente y deseado el uso de los motores de tracción a CA.

Una verdadera revolución se ha vivido en los últimos 30 años en el control eléctrico industrial. El desarrollo de los elementos transistorizados para el accionamiento de motores ha progresado a tal punto de que, prácticamente cualquier problema de control de fuerza puede solucionarse con su uso.

COMPONENTES DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA

Varios tipos principales de elementos semiconductores se utilizan en los circuitos de control de motores. Entre los más importantes están:

1. El diodo
2. El tiristor de dos terminales (o diodo PNP).
3. El tiristor de tres terminales (o rectificador controlado de silicio (SCR)).
4. El tiristor de apagado por compuerta (GTO).
5. El DIAC.
6. El TRIAC.
7. El transistor de potencia (PTR).
8. El transistor bipolar de compuerta aislada (IGBT).

El diodo

Un *diodo* es un elemento semiconductor diseñado para llevar corriente en una sola dirección. En la Fig. 30 se observa el símbolo de este elemento. Un diodo está diseñado para llevar corriente de su ánodo a su cátodo, pero no en la dirección contraria.

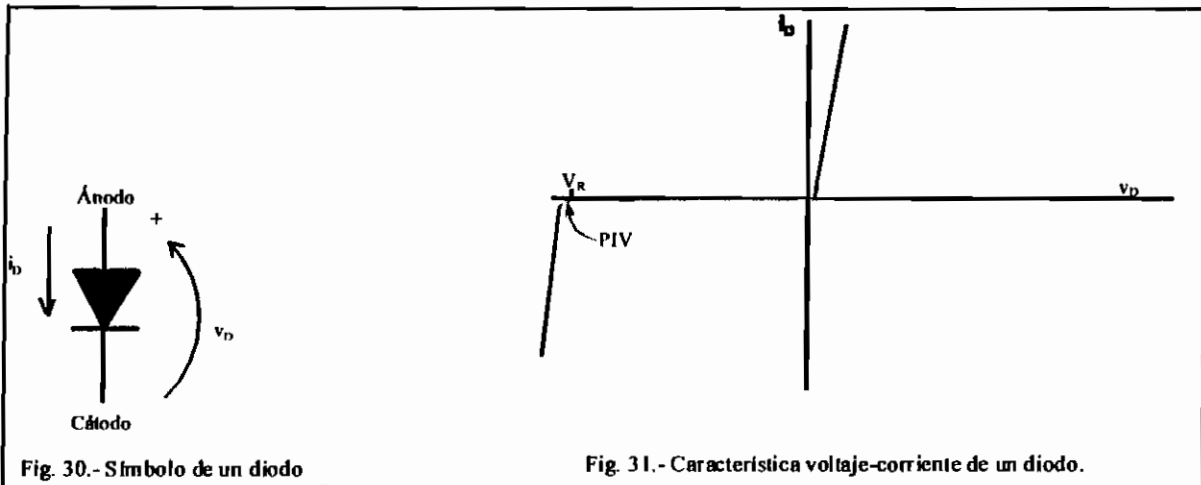


Fig. 30.- Símbolo de un diodo

Fig. 31.- Característica voltaje-corriente de un diodo.

La característica voltaje-corriente de un diodo se ilustra en la Fig. 31. Cuando se aplica un voltaje en dirección hacia delante resulta un flujo cuantioso de corriente. Cuando se aplica al diodo un voltaje en la dirección opuesta, el flujo de corriente disminuye hasta un valor muy pequeño (del orden de microamperios o menos). Si se aplica al diodo un voltaje inverso suficientemente grande, eventualmente se romperá y dejará que la corriente fluya en dirección inversa. Estas tres regiones de la operación de un diodo se muestran en la característica voltaje-corriente, que se ilustra en la Fig. 31.

Los diodos se clasifican por la cantidad de potencia que pueden disipar de manera segura y por el máximo de voltaje inverso que pueden soportar antes de llegar a la

ruptura. La potencia disipada por un diodo durante la operación en directo es igual al producto de la caída de voltaje directo en el diodo por la corriente que circula a través suyo. Esta potencia debe limitarse para evitar que el diodo se recaliente. El máximo voltaje inverso de un diodo se conoce como su *voltaje de pico inverso* (PIV). Éste debe ser lo suficientemente alto como para garantizar que el diodo no se rompa en un circuito y conduzca la corriente en la dirección inversa.

El tiristor de dos terminales o diodo PNP

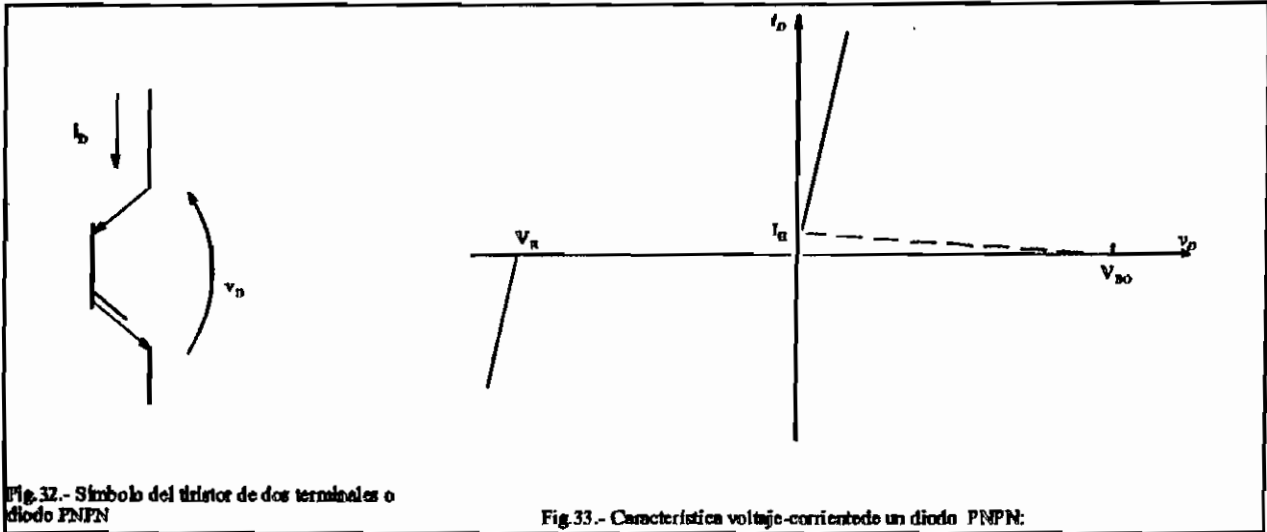


Fig. 32.- Símbolo del tiristor de dos terminales o diodo PNP

Fig. 33.- Característica voltaje-corriente de un diodo PNP.

Tiristor es el nombre con que se conoce una familia de dispositivos semiconductores, hechos de cuatro capas de material semiconductor. Un miembro de esta familia es el tiristor de dos terminales, conocido también como el diodo PNP. El nombre de este aparato, en patrón de símbolos gráficos (IEEE), es *tiristor tipo diodo de reverso bloqueado*. Su símbolo se muestra en la Fig. 32.

El diodo PNP es un rectificador o diodo con una característica voltaje-corriente poco usual, en la región oblicua-directa. Su característica voltaje corriente se ilustra en la Fig. 33.

En la región de reverso bloqueado. El diodo PNP se comporta como un diodo común e impide el flujo de corriente hasta que se alcance la tensión disruptiva inversa. En la región de conducción, el diodo PNP se comporta nuevamente como un diodo común, permitiendo que fluyan grandes cantidades de corriente con muy poca caída de voltaje. Lo que distingue un diodo PNP de un diodo común es la región de bloqueo directo.

Cuando un diodo PNP es directo-oblicuo, no fluye ninguna corriente hasta que la caída de voltaje directo excede un cierto valor llamado *voltaje de ruptura directo* V_{BO} . Cuando el voltaje directo a través del diodo PNP excede V_{BO} , se activa y permanece activado hasta que la corriente que fluye a través suyo cae por debajo de un cierto valor mínimo (de manera típica, unos pocos miliamperios). Si la corriente se reduce a un valor por debajo de este mínimo (llamada *corriente retenedora* I_H), el diodo PNP se desactiva y no continuará hasta que la caída de tensión directa exceda nuevamente V_{BO} .

En resumen, un diodo PNP

1. Se activa cuando el voltaje de alimentación v_D supera V_{BO} .
2. Se desactiva cuando la corriente i_D cae por debajo de I_H .
3. Obstruye todo flujo de corriente en dirección inversa hasta que se supere el voltaje máximo inverso.

El tiristor de tres terminales o SCR

El miembro más importante de la familia de los tiristores es el tiristor de tres terminales, conocido también el *rectificador controlado de silicio* o SCR. Este dispositivo lo desarrolló la General Electric en 1958 y lo denominó SCR. El nombre de tiristor lo adoptó posteriormente la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI).

El SCR es un rectificador controlado o diodo. Su característica voltaje-corriente, con la compuerta de entrada en circuito abierto, es la misma que la del diodo PNP.

Lo que hace al SRC especialmente útil para el control de motores en sus aplicaciones es que el *voltaje de ruptura o de encendido puede ajustarse* por medio de una corriente que circula hacia su compuerta de entrada. Cuanto mayor sea la corriente de la compuerta, tanto menor se vuelve V_{BO} (ver Fig. 35). Si se escoge un SRC de tal manera que su voltaje de ruptura, sin señal de compuerta, sea mayor que el mayor voltaje en el circuito, entonces, solamente puede activarse mediante la aplicación de una corriente a la compuerta. Una vez activado, el dispositivo permanece así hasta que su corriente caiga por debajo de I_H . Además, una vez que se dispare el SCR, su corriente de compuerta puede retirarse, sin

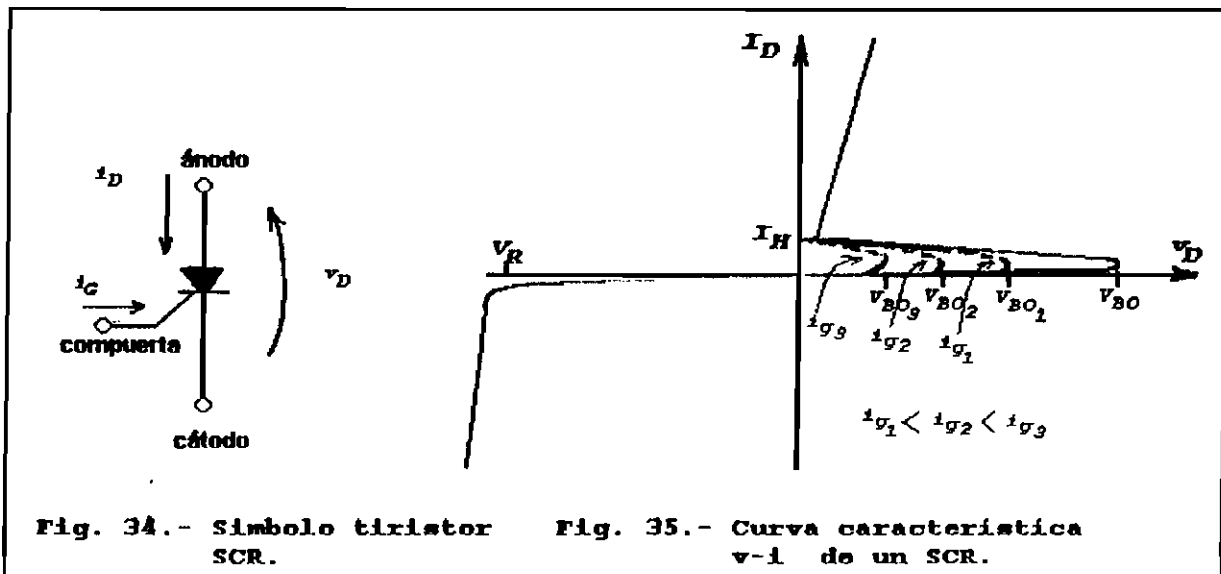


Fig. 34.- Símbolo tiristor SCR.

Fig. 35.- Curva característica $v-i$ de un SCR.

que afecte su estado activo. En este estado, la caída de voltaje directo a través del SCR es cerca de 1,2 a 1,5 veces mayor que la caída de voltaje a través de un diodo directo-oblicuo común.

Los tiristores de tres terminales o SCR son, sin lugar a dudas, los dispositivos de uso más común en los circuitos de control de potencia. Se utilizan ampliamente para cambiar o

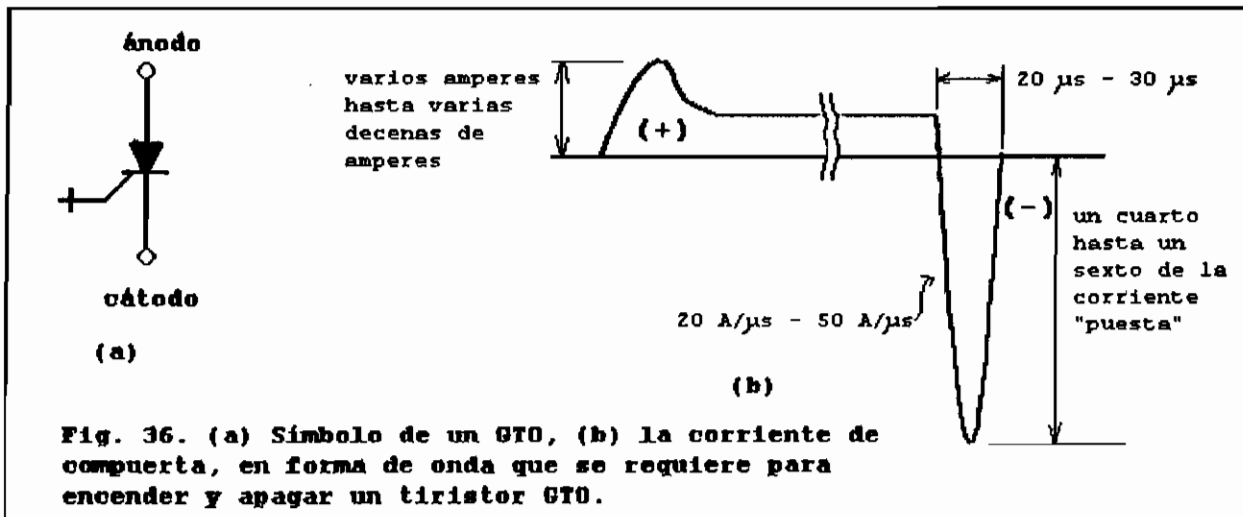
rectificar aplicaciones y actualmente se encuentran en clasificaciones que van desde unos pocos amperios hasta un máximo de 3.000 A.

En resumen, un SCR.

1. Se activa cuando el voltaje v_D que lo alimenta excede V_{BO} .
2. Tiene un voltaje de ruptura V_{BO} , cuyo nivel se controla por la cantidad de corriente i_G , presente en el SCR.
3. Se desactiva cuando la corriente i_D que fluye por él cae por debajo de I_H .
4. Detiene todo flujo de corriente en dirección inversa, hasta que se supere el voltaje máximo inverso.

Tiristor de apagado por compuerta (GTO).

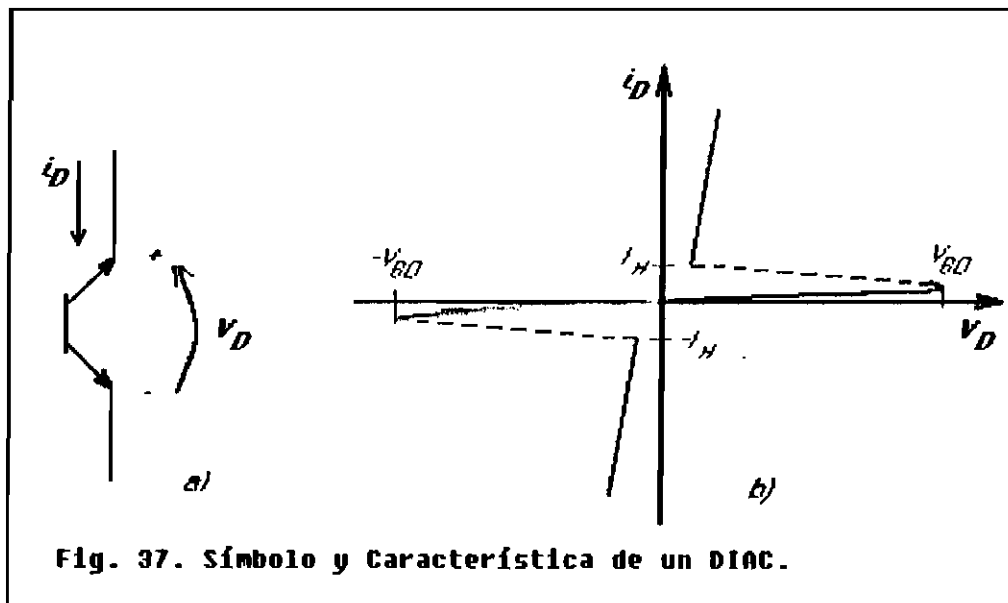
Entre las mejoras más recientes que se han hecho al tiristor está el apagado por compuerta (GTO). Un tiristor GTO es un SCR que puede apagarse por una pulsación suficientemente grande en su compuerta de entrada, aun si la corriente i_D excede I_H . Aunque los tiristores GTO se han venido usando desde 1960, solamente se volvieron prácticos para las aplicaciones de control de motores, al final de los años 70. Estos dispositivos se han vuelto más y más comunes en las unidades de control de motores, puesto que eliminaron la necesidad de componentes externos para apagar los SRC en circuitos cc.



La Fig. 36b nos muestra una típica forma de onda de la corriente de compuerta de un tiristor GTO de alta potencia. Un tiristor GTO requiere una mayor corriente de compuerta para encendido que un SCR común. Para grandes aparatos de alta potencia se necesitan corrientes de compuerta del orden de 10 A o más. Para apagarlos se necesita una gran pulsación de corriente negativa de entre 20 y 30 μs de duración. La magnitud de la pulsación de corriente negativa debe ser de un cuarto a un sexto de la corriente que pasa por el aparato.

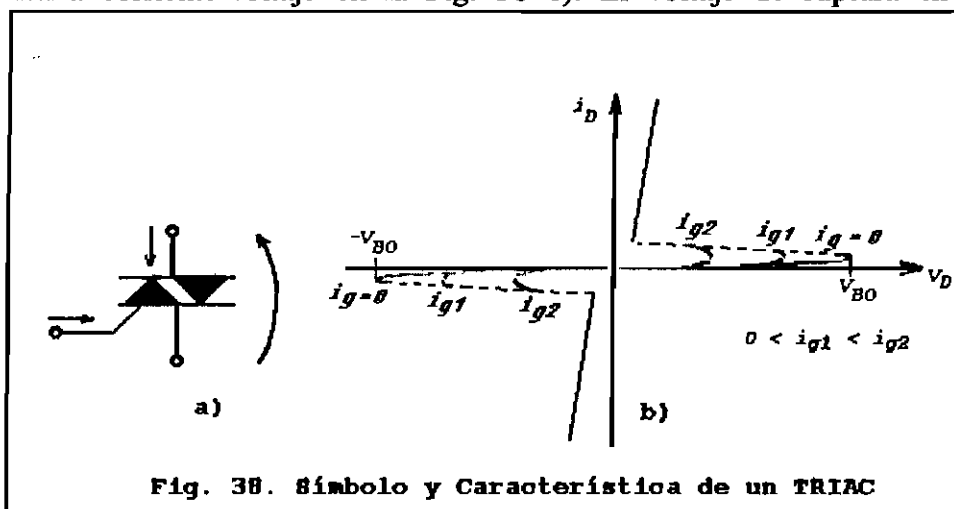
EI DIAC

Es un dispositivo que se comporta como dos diodos PNPN conectados en forma contrapuesta. Puede conducir en cualquier dirección una vez que el voltaje de ruptura se sobrepasa. En la Fig. 37 a) se ilustra el símbolo del DIAC; su característica corriente-voltaje puede verse en la Fig. 37 b). Se enciende cuando el voltaje de alimentación, en *cualquier dirección*, sobrepasa V_{BO} . Una vez que se enciende, el DIAC permanece encendido hasta que su corriente cae por debajo de I_H .



EI TRIAC

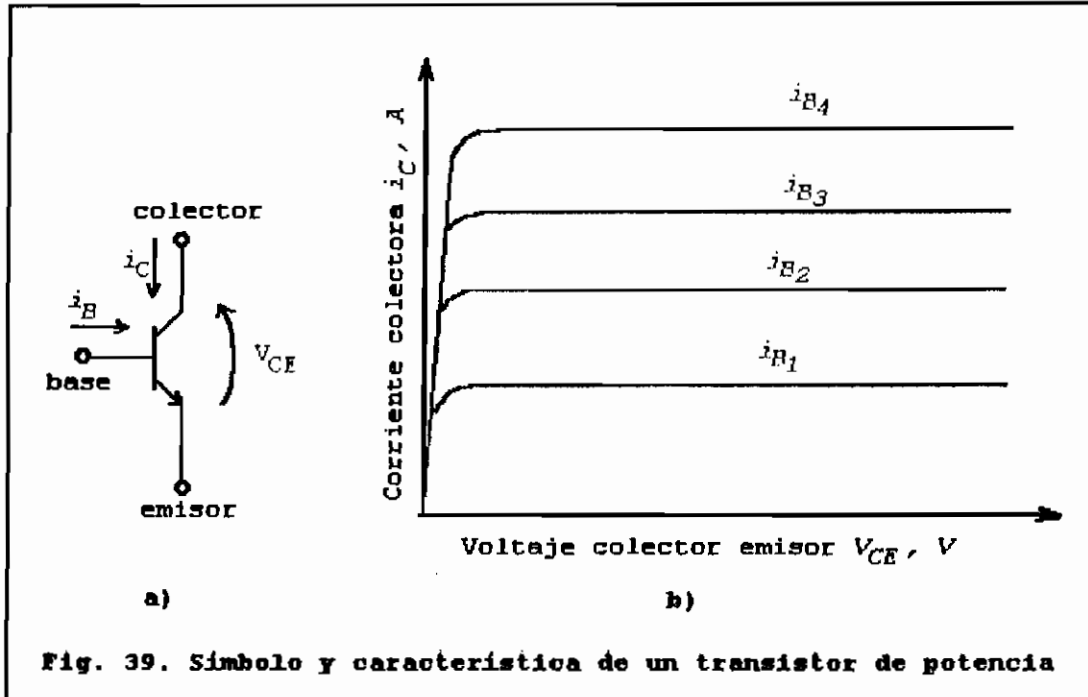
Es un dispositivo que se comporta como dos SCR conectados en contraposición, con una compuerta de paso común; puede ir en cualquier dirección desde el momento en que el voltaje de ruptura se sobrepasa. El símbolo del TRIAC se ilustra en la Fig. 38 a) y su característica corriente-voltaje en la Fig. 38 b). El voltaje de ruptura en un TRIAC



disminuye si se aumenta la corriente de compuerta. En la misma forma que lo hace en un

SCR, con la diferencia que un TRIAC responde tanto a los impulsos positivos como a los negativos de su compuerta. Una vez encendido, un TRIAC permanece así hasta que su corriente cae por debajo de I_H .

Transistor de Potencia



En la Fig. 39 a), se muestra el símbolo de un transistor y en b) el voltaje colector a emisor *versus* la característica de corriente colectora del dispositivo. Tal como se puede observar de la característica, en esta última figura, el transistor es un elemento cuya corriente colectora i_C es directamente proporcional a su corriente de base entre una amplia gama de voltajes de colector a emisor (V_{CE}).

Los transistores de potencia se usan más frecuentemente en circuitos inversores. Su desventaja mayor, para cambiar de aplicaciones, consiste en que los transistores de gran potencia son relativamente lentos para cambiar del estado activado al desactivado y viceversa, ya que se les tiene que aplicar una corriente de base relativamente grande suprimírsele para encenderse o apagarse.

Transistor bipolar de compuerta aislada

El transistor bipolar de compuerta aislada (IGBT) es, relativamente, de reciente desarrollo; es similar al transistor de potencia, excepto que se controla por la tensión de alimentación a una compuerta, a diferencia del transistor de potencia en donde la corriente fluye en la base. La impedancia de la compuerta de control es muy alta en el IGBT, de tal modo que la corriente que fluye en la compuerta es sumamente pequeña. El dispositivo equivale, en esencia, a la combinación de un transistor de efecto de campo con semiconductor de óxido metálico (tecsom) y un transistor de potencia. El símbolo de un IGBT se muestra en la Fig.40.

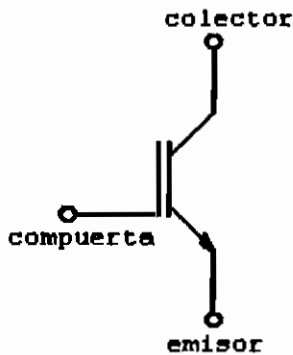
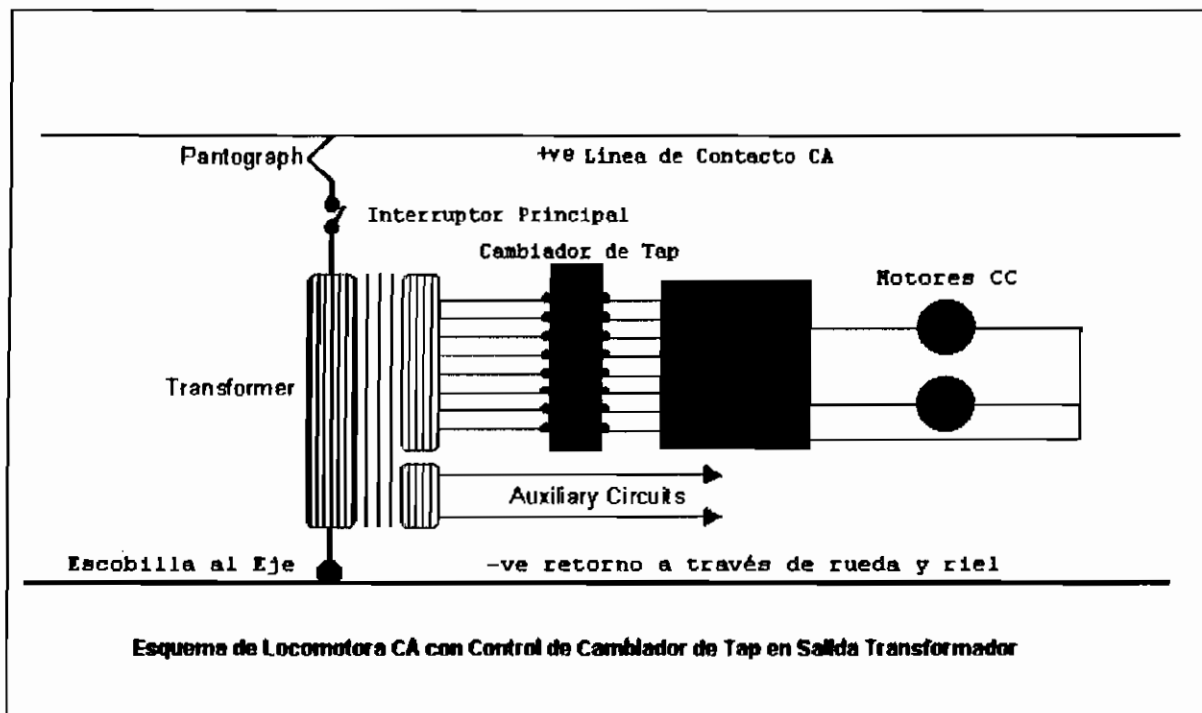


Fig. 40. Símbolo de un IGBT

Puesto que el IGBT se controla por un voltaje de compuerta con muy poco flujo de corriente, puede cambiar mucho más rápidamente de que un transistor de potencia convencional lo haría. Los IGBT, por consiguiente, se están usando en aplicaciones de alta frecuencia y alta potencia.

EJEMPLOS DE LOCOMOTORAS CON CIRCUITOS DE TRACCIÓN EMPLEANDO LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA.

Locomotoras CA con Tracción CC

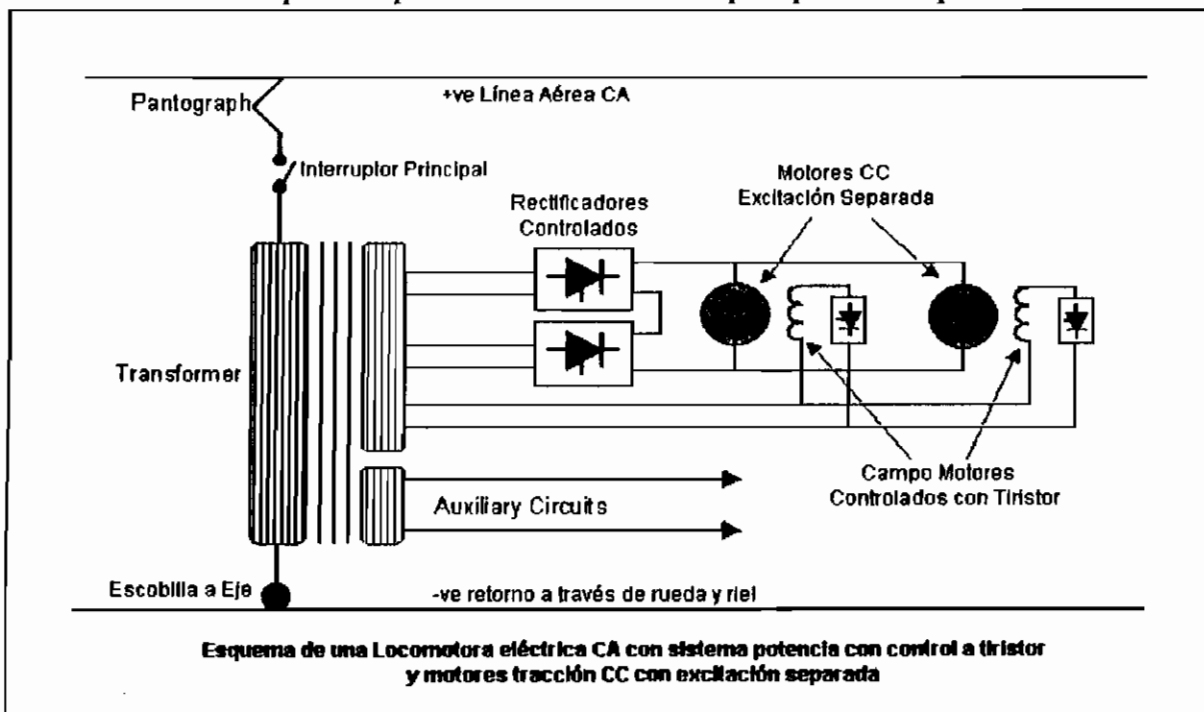


El diagrama (arriba) muestra un esquema simplificado de una locomotora eléctrica de CA a 25 kV en uso en Europa en la década de 1960s. El voltaje de 25 kV CA es captado por el pantógrafo y pasado a un transformador. El transformador baja el voltaje a un nivel que puede ser manejado por los motores de tracción. El rango de corriente aplicado a los motores es controlado por el “cambiador de tap”, el que varía la salida del transformador para aumentar o disminuir el voltaje aplicado a los motores. Su trabajo es el mismo que el del reóstato de aceleración usado en la tracción CC, donde los contactores son controlados por la operación del comando del maquinista.

Antes de pasar a los motores la CA es rectificada a CC pasando a través de rectificadores. En los últimos 30 años, los rectificadores usados son diodos de silicio y sus derivados, el continuo desarrollo de los cuales ha llevado al presente "estado-del-arte" de los sistemas de tracción CA.

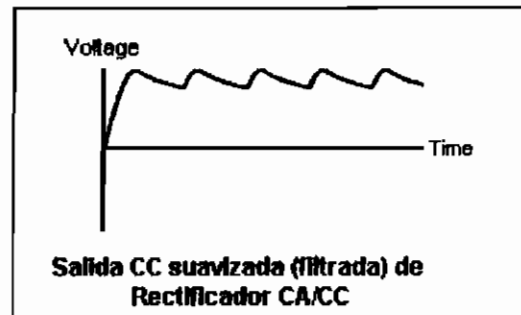
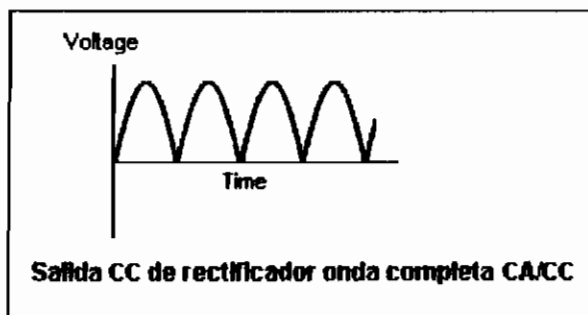
Uso del Tiristor

Como vimos anteriormente, el tiristor es un diodo más desarrollado, pero que actúa igual que el diodo permitiendo la circulación de la corriente en una dirección, sólo difiere con éste en que solamente permitirá el flujo de corriente cuando se haya activado su "compuerta". Una vez que el tiristor se ha activado, hay una sola forma de apagarlo, enviando una corriente en sentido opuesto. Esto se simplifica en una locomotora CA porque la corriente cambia su dirección en cada ciclo. Con este desarrollo, los rectificadores controlados hicieron posible que los cambiadores de taps rápidamente pasaran a la historia.



Una versión simplificada de una locomotora eléctrica a 25 kV CA es la que se muestra en el esquema de arriba.

De taps tomados del secundario del transformador se alimenta a cada motor CC cada uno



de los cuales tiene sus propios tiristores y diodos de control. La CA del transformador se rectifica a CC, onda completa, como aparece abajo a la izquierda en la figura de más arriba. En la práctica se agrega un circuito de filtrado que suaviza y elimina la mayor parte del “ripple” entregando un flujo de energía más constante como se muestra a la derecha en la figura anterior.

Mientras tanto, el nivel de potencia al motor se controla variando el punto en cada ciclo rectificado en el cual se enciende el tiristor. Atrasando por compuerta el encendido al tiristor en cada ciclo, baja la corriente disponible en el motor. Si el encendido se adelanta, aumenta la cantidad de corriente hasta que los tiristores estén encendidos en el ciclo completo. Esta forma de control se conoce como “control de ángulo de fase”.

SEPEX

En los sistemas de control por tiristor más recientes, los motores mismos se bobinan en forma diferente de los antiguos motores serie CC. Las armaduras ya no se disponen en serie con los campos, éstos se excitan en forma separada, conocido como SEPEX. Cada campo tiene su propio tiristor, que se usa para controlar individualmente los campos en forma más precisa.

Ya que los motores se excitan separadamente, la secuencia de aceleración se efectúa en dos etapas. En la primera etapa, las armaduras se alimentan con sus tiristores hasta alcanzar el voltaje pleno. Esto podría dar alrededor del 25 % de la velocidad total de la locomotora. En la segunda etapa, los tiristores de campo se usan para debilitar la corriente de campo, aumentando así la velocidad, similarmente a como funciona el shuntaje de campo en las aplicaciones no electrónicas.

Un gran avance de SEPEX es que el deslizamiento de ruedas puede ser detectado y corregido más rápidamente que en el sistema tradicional, que emplea un “relé de deslizamiento” el cual llega a cortar la potencia y después la restaura.

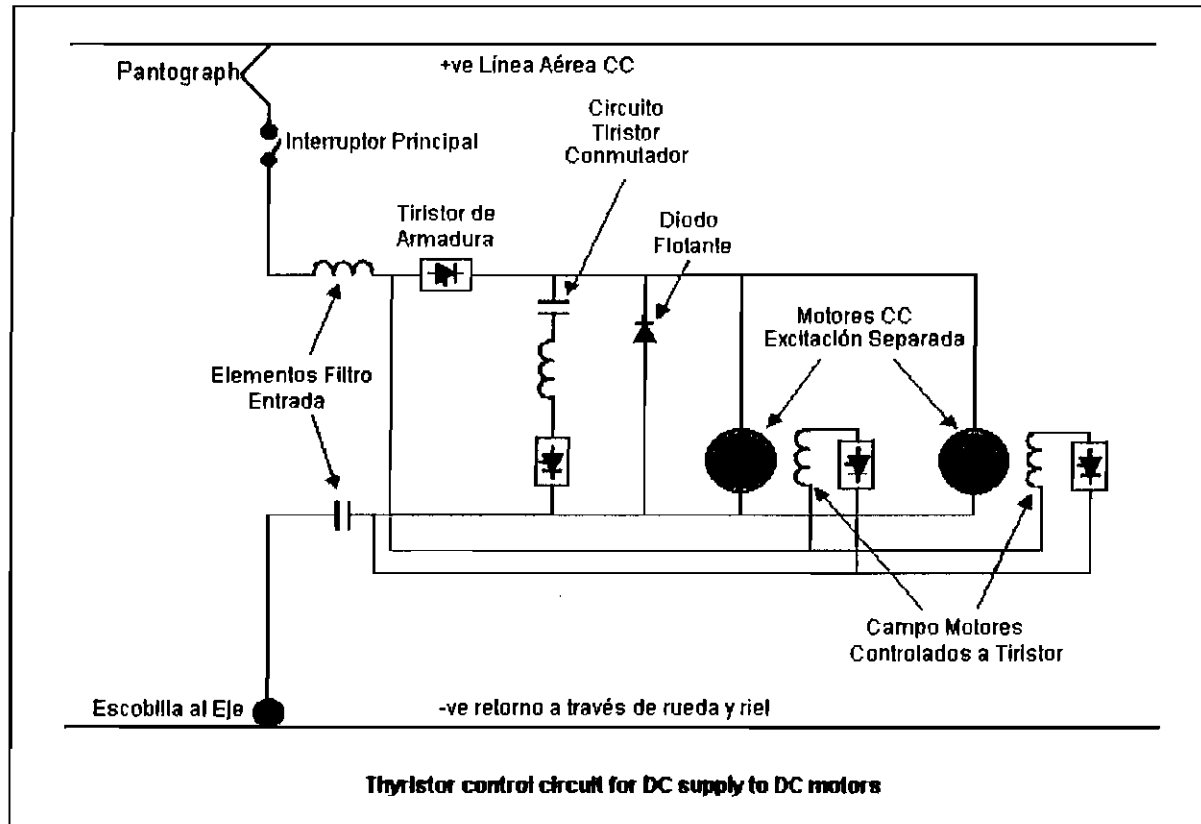
Choppers de CC

Inmediatamente después que los tiristores mostraran su funcionamiento en la tracción a CA, todo el mundo los empezó a mirar para usarlos en sistemas CC. El mayor problema fue de cómo apagar el tiristor una vez encendido, en otras palabras, cómo colocar un voltaje inverso para operar en un circuito CC esencialmente unidireccional. Esto se hizo agregando un “circuito de resonancia” que utiliza un inductor y un capacitor para forzar la corriente a circular en sentido opuesto al normal. Esto tiene el efecto de apagar el tiristor, o “conmutarlo”. Esto se muestra como parte del diagrama de más adelante como circuito de control a tiristor CC. Tiene su propio tiristor para apagar cuando se requiere.

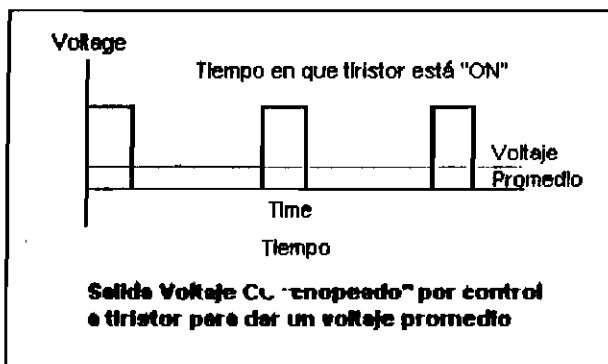
Otros dos elementos importantes del circuito a tiristor CC son el “diodo flotante” y el filtro de entrada. El diodo flotante mantiene la circulación de corriente en el motor mientras el tiristor está apagado, usando al propio motor como inductancia electromagnética. Sin el circuito del diodo, la corriente en el motor podría bajar y el motor disminuir la velocidad.

El control a tiristor puede crear una serie de interferencias eléctricas, con todos los circuitos que estén alrededor de la línea aérea. Para prevenir estas interferencias originadas

en los trenes hacia las líneas de suministro, se dispone del “filtro de entrada” o “filtro de línea” compuesto de un capacitor y un inductor.



El tiristor en aplicaciones de tracción CC controla la corriente aplicada a los motores recortándola en segmentos, pequeños al comienzo del proceso de aceleración, y gradualmente agrandándolos cuando aumenta la velocidad. Este sistema de control de potencia CC a CC, se conoce con el nombre de “control chopper” o “trozador” si se lo quiere españolizar. Visualmente está representado por la figura de al lado, donde el tiempo encendido del tiristor se regula para controlar el voltaje promedio en el circuito del motor. Si se aumenta el tiempo de “encendido” (“ON”), aumenta el voltaje promedio y la velocidad del motor. Este sistema comenzó a aparecer en automotores en Europa durante los años ‘1980.



Este sistema comenzó a aparecer en automotores en Europa durante los años ‘1980.

Frenado Dinámico

Los trenes equipados con control a tiristor pueden fácilmente usar frenado dinámico, donde los motores funcionando como generadores descargan la corriente resultante en una resistencia dispuesta a bordo (frenado reostático) o realimentando el sistema de suministro

(frenado regeneración). Los circuitos se reconfiguran, usualmente mediante un contactor múltiple “motor/freno” operado por un comando del maquinista, para permitir a los tiristores a controlar la corriente que retarda a los motores. Una ventaja de los circuitos de control a tiristor es su habilidad para elegir ya sea en frenado regenerativo o reostático simplemente por la detección automática de la receptividad de la línea. De modo que, cuando el voltaje regenerado a través de la conexión de suministro en el circuito del filtro llega a ser más alto que el presente en la línea, se enciende un tiristor para desviar la corriente a una resistencia.

El Tiristor GTO

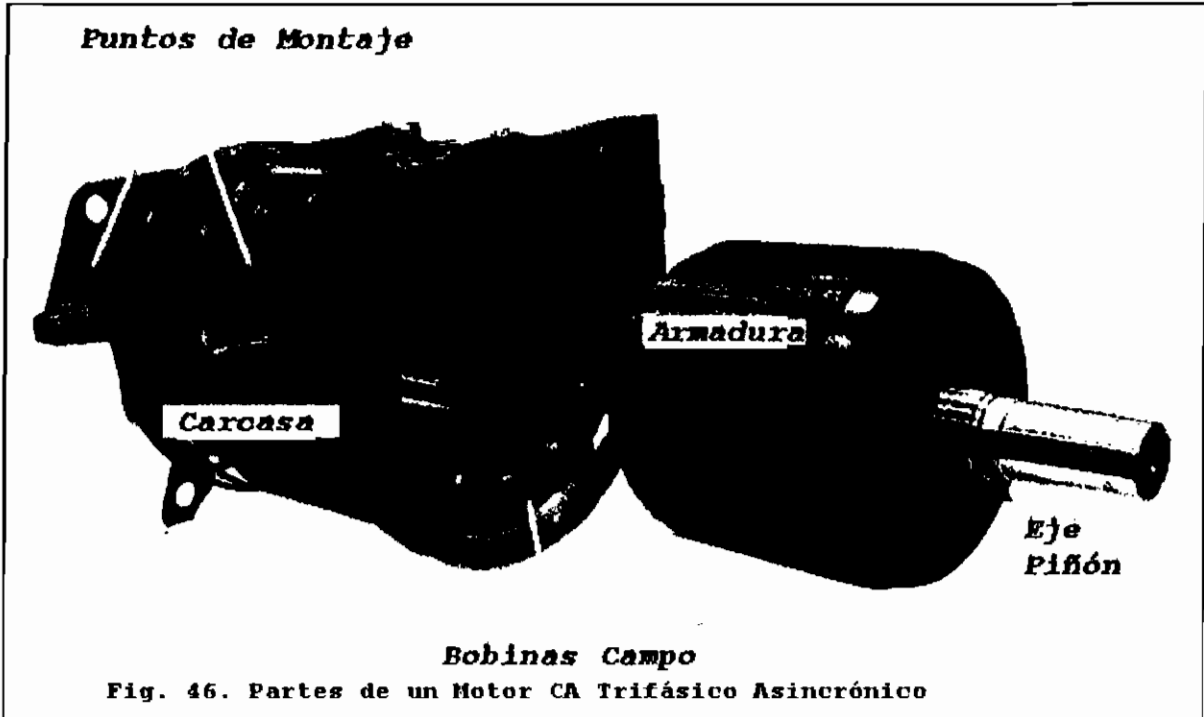
Por la década de 1980s, el tiristor fue desarrollado a un estado tal que podía apagarse por un circuito de control del mismo modo a como se encendía. Este fue el tiristor “*apagado por compuerta*” (“*gate turn off*”) o GTO. Esto permitió eliminar los circuitos de conmutación en los circuitos de potencia alimentados con CC, ahorrándose varios elementos electrónicos en cada circuito. Ahora los tiristores podían encenderse y apagarse virtualmente y se podía usarse un solo tiristor para controlar un motor CC.

Este fue el punto que se alcanzó con los motores convencionales de CC en su último estado en la industria de tracción ferroviaria. La mayoría de los sistemas están utilizando ahora motores CA.

Motores CA

Hay dos tipos de motores de CA, sincrónicos y asíncrónicos. Los motores sincrónicos tienen las bobinas de campo montadas en el rotor y las del inducido en la carcasa, a la inversa de la práctica normal. Los motores sincrónicos se han usado en la tracción eléctrica – la más conocida en Francia en el tren TGV Atlantique. Este se alimenta a 25 kV CA, rectificado a CC y luego invertido de nuevo a CA para alimentar los motores de tracción. Esto fue diseñado antes que los tiristores GTO estuvieran suficientemente desarrollados para uso ferroviario y se usaron tiristores simples. La ventaja del motor sincrónico en esta aplicación es que el motor produce el voltaje inverso necesario para apagar el tiristor. Fue una buena solución en esos días pero fue rápidamente sobrepasado por el otro tipo de motor de CA – el motor asíncrónico – cuando estuvieron disponibles los tiristores GTO de potencia.

El Motor Asincrónico



El motor asincrónico, llamado también *motor de inducción*, es un motor que comprende un rotor o armadura y un estator o carcasa. En la carcasa se ubican las bobinas inductoras que desarrollan *el campo magnético rotatorio*. Hay dos tipos diferentes de rotores de motor de inducción. A uno se le llama *rotor de jaula de ardilla* o simplemente *rotor de jaula*, mientras que el otro se llama *rotor devanado*.

Los motores usados en la tracción ferroviaria son del tipo de rotor de jaula. En la Fig. 46 se muestra un típico motor de tracción trifásico con rotor de jaula. Un rotor de este tipo, consiste en una serie de barras conductoras, colocadas en ranuras talladas en la cara del rotor y con sus extremos puestos en corto circuito, por medio de anillos de corto circuito.

El principio de funcionamiento es el siguiente: los devanados del inductor o bobinas de campo, se disponen de tal modo en la carcasa que cuando se imprime en ellos un voltaje de CA trifásico genera un campo magnético giratorio. La velocidad de rotación del campo magnético, llamada *velocidad sincrónica*, se expresa por

$$n_{sinc} = \frac{120 f_e}{P}$$

En donde f_e es la frecuencia del sistema en hertz y P el número de polos de la máquina. El campo rotatorio induce un voltaje en las barras del rotor cuya ecuación es la siguiente

$$e_{ind} = (v * B) * l$$

En donde v = velocidad de las barras *con respecto al campo magnético*
 B = densidad de flujo magnético del estator
 l = longitud de la barra del rotor

El movimiento *relativo* del rotor con relación al campo magnético del estator es lo que produce el voltaje inducido en una barra del rotor. Las corrientes inducidas en las barras generan un campo magnético en el rotor B_R el cual reacciona frente al campo giratorio produciendo el par o torque motriz que da origen al giro del rotor.

El torque inducido en la máquina se expresa por

$$\tau_{ind} = k B_R * B_S$$

No obstante, la velocidad del motor tiene un límite superior finito. Si el rotor del motor de inducción girara a *velocidad sincrónica*, entonces sus barras permanecerían estacionarias con relación al campo magnético y no habría inducción de voltaje. Por lo tanto tampoco habría corriente ni campo magnético en el rotor, el torque sería cero y el motor tendería a frenarse por las pérdidas por fricción. Un motor de inducción puede, en esta forma, acelerarse hasta cerca de la velocidad sincrónica, pero jamás podrá alcanzar exactamente la velocidad sincrónica.

Dos términos se usan comúnmente para definir el movimiento relativo del rotor y los campos magnéticos. Uno es la *velocidad de deslizamiento*, que se define como la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor:

$$n_{desliz} = n_{sinc} - n_m$$

El otro término usado para describir el movimiento relativo es el *deslizamiento*, que es la velocidad relativa expresada con base en por-unidad o en porcentaje. Es decir, el deslizamiento se define como

$$s = \frac{n_{desliz}}{n_{sinc}} (x100\%)$$

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (x100\%)$$

En la Fig. 47, se ilustra el torque de un motor de inducción en función (y del deslizamiento). En la Fig. 48 se muestran las velocidades, tanto por encima como por debajo de los límites normales del motor. Al respecto podemos comentar lo siguiente:

1. El torque del motor es cero a velocidad sincrónica.
2. La curva de torque-velocidad es casi lineal entre vacío y plena carga. Entre estos límites, la resistencia del rotor es mucho mayor que su reactancia, por lo que su corriente, campo magnético y torque aumentan linealmente al aumentar el deslizamiento.
3. Hay un momento o torque máximo que no puede sobrepasarse. Este momento, llamado también *momento de desenganche* es de dos a tres veces el torque nominal a plena carga del motor.
4. El torque de arranque es ligeramente mayor que el de plena carga, por lo cual el motor arrancará soportando cualquier carga que se le ponga a plena potencia.

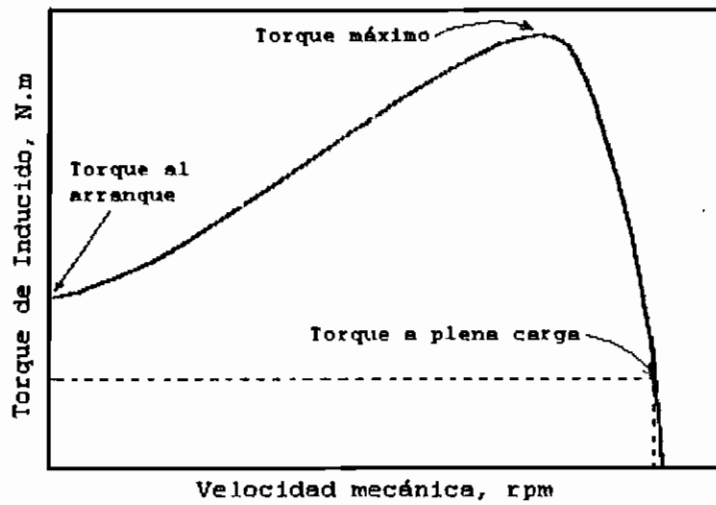


Fig. 47. Característica Torque-Velocidad de un motor de inducción

convierte en un generador, transformando la potencia mecánica en potencia eléctrica.

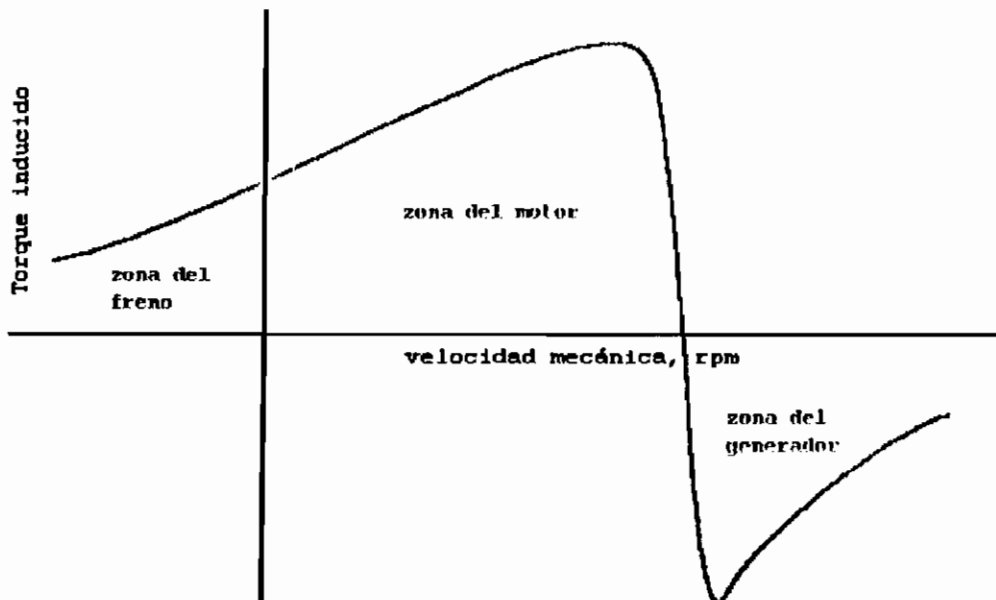


Fig. 48. Característica torque-velocidad motor de inducción extendida a zona frenado y generador

5. El torque en el motor, para un cierto deslizamiento, varía en proporción al cuadrado del voltaje aplicado. Este hecho es útil para tener alguna forma de control sobre la velocidad del motor de inducción.

6. Si el motor de inducción se hace girar más rápido que la velocidad sincrónica, entonces la dirección del torque se invierte en el rotor de la máquina y ésta se

7. Si el motor retrocede en relación a la dirección de los campos magnéticos, el torque en la máquina la detendrá muy rápidamente y tratará de hacerla girar en dirección contraria. Como invertir el sentido de rotación del campo magnético

es, relativamente fácil, basta cambiar un par de fases en el estator, por lo que este sistema es utilizado para frenar muy rápidamente a los motores de inducción.

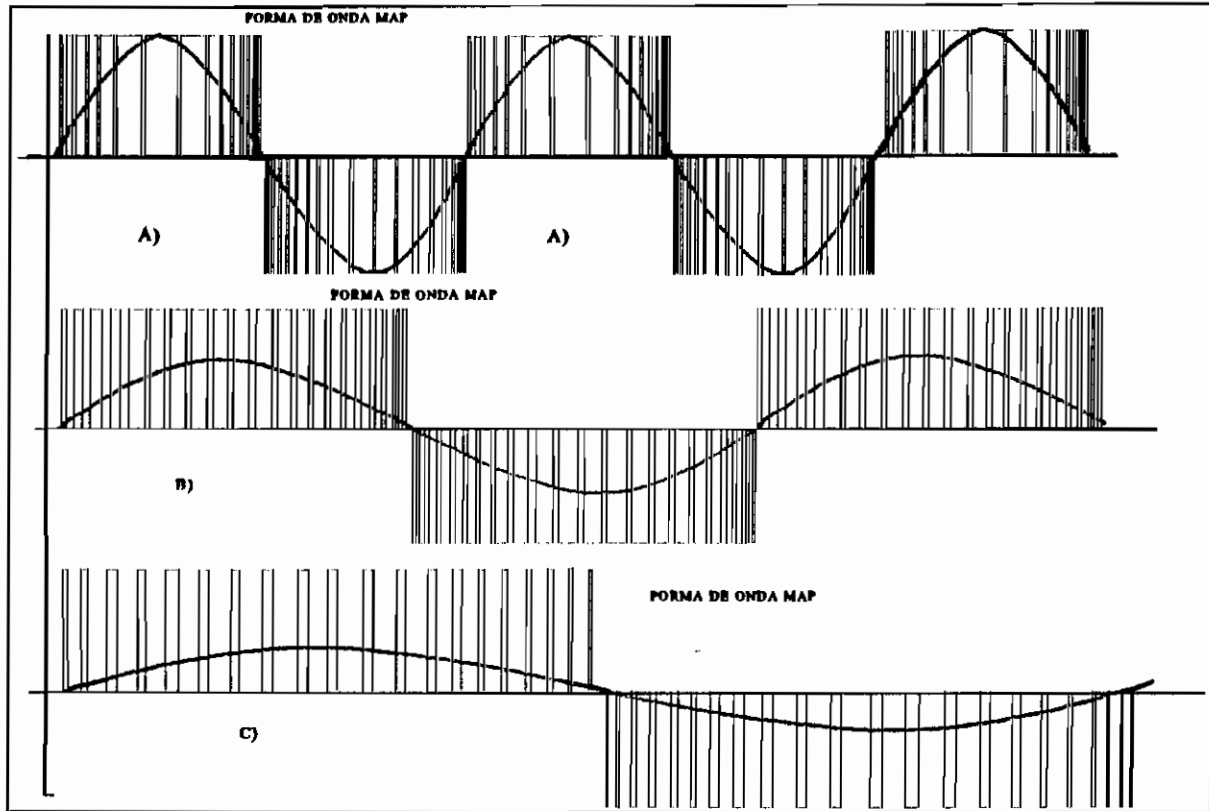


Fig. 49. Control simultáneo de voltaje y frecuencia de onda MAP.

Control de Velocidad de los motores de inducción.

El método preferido hoy en día para el control de la velocidad de los motores de inducción es utilizar los accionamientos de estado sólido de frecuencia y voltaje variable.

El voltaje de salida y el control de frecuencia se logra utilizando las técnicas de modulación por ancho de pulso (MAP)⁷. Tanto la frecuencia de salida como el voltaje de salida pueden controlarse independientemente por medio de la modulación por ancho de pulso. La Fig. 49 muestra ondas típicas de voltaje de salida de una fase del accionamiento, para la situación en que la frecuencia y el voltaje han variado simultáneamente en forma lineal.⁸

Obsérvese que el máximo voltaje producido permanece igual en los tres casos; el nivel del voltaje efectivo se controla por la fracción de tiempo en que el voltaje se activa y la frecuencia, por la velocidad a la cual la polaridad de las pulsaciones se conmuta de positivo a negativo y viceversa.

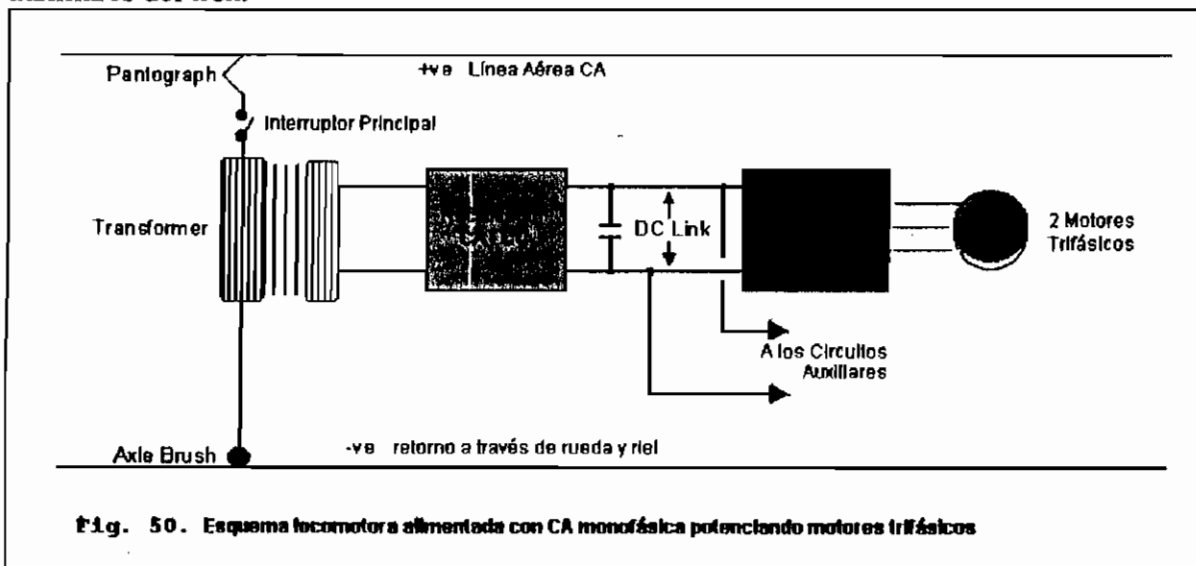
⁷ En inglés PWM (Pulse Width Modulation).

⁸ Las formas de onda reproducidas en la Fig. 49 son en realidad formas de onda simplificadas. La frecuencia portadora es mucho más alta que la que se muestra en la figura.

Tracción CA

La electrónica moderna ha permitido disponer de la tracción a CA. Esta llegó a estar disponible solamente con la electrónica moderna porque la velocidad de los motores CA trifásicos está determinada por la frecuencia de su suministro pero, al mismo tiempo, la potencia ha de ser variada. Los motores de tracción trifásicos modernos se controlan alimentándolos con CA trifásica que a través del campo magnético rotatorio hace girar la máquina. Las tres fases son provistas por un inversor que entrega al motor voltajes variables y frecuencia variable (VVVF). Las variaciones del voltaje y frecuencia se controlan electrónicamente.

Los motores CA se pueden usar ya sea con sistemas de alimentación CA o CC. en el caso de suministro CA (Fig. 50), el voltaje de línea (sigamos 25 kV monofásico) alimenta a un transformador y el secundario entrega al banco rectificador que produce una salida CC de entre 1500 a 2000 volts dependiendo de la aplicación. Esta luego se pasa al inversor que entrega la CA trifásica para los motores de tracción. La conexión entre el rectificador y el inversor se llama enlace CC. Este generalmente también suministra energía a los circuitos auxiliares del tren.

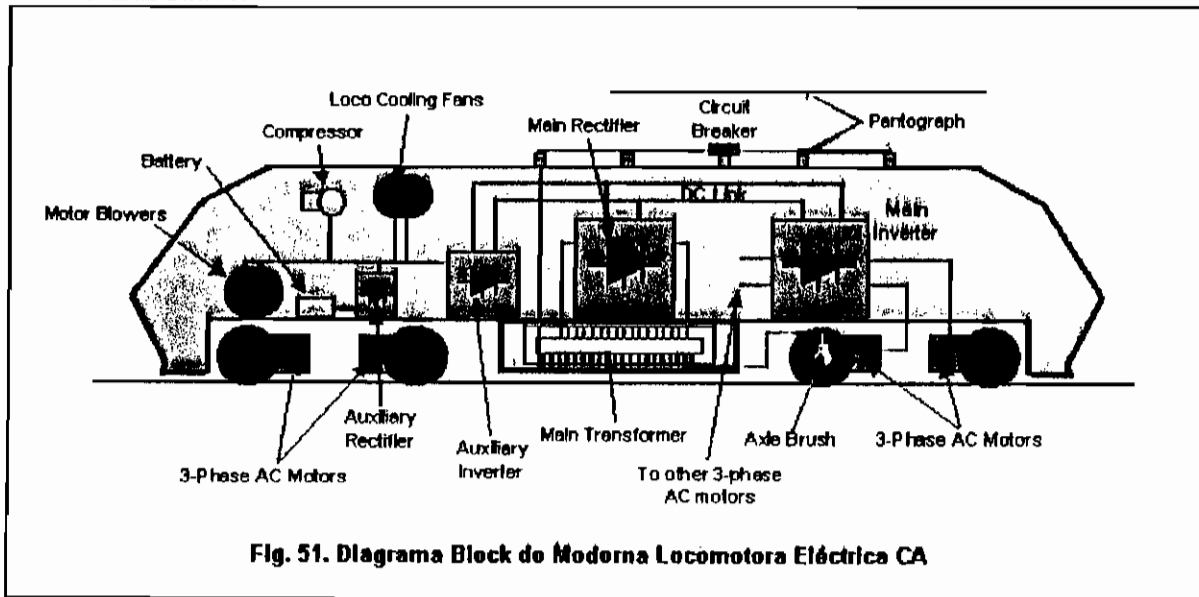


Todos los tiristores son GTOs, incluyendo los del rectificador, ya que éstos se usan ahora para entregar una salida más eficiente que la que era posible con los antiguos tiristores. En suma, todas las facilidades de control de los motores CC están disponibles, incluyendo el frenado dinámico, pero con más eficiencia y con menos partes móviles. Aplicada a suministros de línea CC. Los grupos trifásicos son más simples todavía, ya que no necesitan ni transformador ni rectificador. El voltaje de la línea CC se aplica al inversor, el que entrega las 3 fases a los motores.

IGBT

Habiéndose logrado aceptar el uso casi universal de los tiristores GTOs en la tracción CA como el sistema de tracción más moderno existente, la industria electrónica de potencia ha

desarrollado un nuevo producto. Es el IGBT o *Transistor Bipolar de Compuerta Aislada* (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). El transistor fue el precursor de la electrónica moderna, y puede encenderse y apagarse igual que un tiristor. Sin embargo, estos fueron hasta hace muy poco, solamente capaces de manejar pequeñas corrientes medidas en amperes. Ahora, los modernos aparatos, en la forma del IGBT, pueden manejar miles de amperes y están apareciendo en las aplicaciones de tracción. Una versión de baja corriente fue primero usada en lugar de tiristores en inversores de suministro de auxiliares a comienzos de los 90s pero versiones de más rango están ahora entrando en servicio en los más recientes móviles de tracción CA. Su principal beneficio es que pueden cambiar mucho más rápido (tres a cuatro veces más rápido) que los GTOs. Esto reduce la corriente requerida y por lo tanto el calor generado, dando unidades más pequeñas y livianas. Esta mayor rapidez de conmutación también reduce el ruido y hace la aceleración del tren mucho más suave.



Tecnología IGBT en Aplicaciones de Alta Potencia

En un reciente artículo técnico aparecido en la revista *International Railway Journal IRJ*, del mes de abril de 2000, escrito por profesionales del Adtranz⁹, Suiza, se informa que Adtranz ha producido una nueva familia de Convertidores de Potencia Modulares (MPC) abriendo las puertas a la tecnología IGBT y sus numerosas ventajas para las aplicaciones de potencia en la tracción eléctrica.

El resultado es el convertidor de tracción MPC, que contribuye a la optimización de los vehículos en un todo, y que reúne los requerimientos de hoy de una manera económica y ecológica.

No hace mucho la tecnología IGBT se limitaba a los rangos de baja y media potencia. La serie MPC usa las ventajas de la tecnología IGBT junto con la experiencia de la tecnología GTO y la adapta en aplicaciones de tracción de alta potencia.

⁹ Thomas Lüttin, Product Manager, High Power Traction Converters; Dr Ingo Herbst, Project Manager, MPC; Urs Meyer, Manager, Mechanical Design, High Power Traction Converters.

La principal ventaja de la tecnología IGBT es una significativa reducción en las pérdidas de potencia y por consiguiente el aumento del rendimiento del convertidor. En un ambientamiento amigable, la serie MPC enfriada por agua tiene más beneficios tales como un diseño compacto, liviano, modular con completo acceso y salida de potencia escalable.

Junto con amigables procedimientos de mantención y reparación hacia el usuario, los

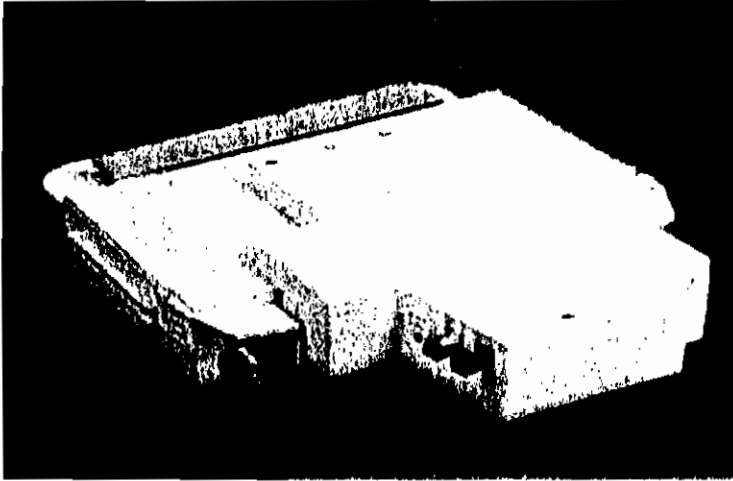


Fig. 52.- Integrated Power Module (IPM).

mejoramientos en el rendimiento llevan a notables reducciones en los costos de operación. Se pueden implementar todos los tipos de convertidores, desde los montados bajo el piso de automotores eléctricos, a aplicaciones de sala de máquinas en locomotoras. Similarmente, están cubiertas por las series MPC todas las topologías de circuitos, desde sistemas de alimentación a c-a a aplicaciones multisistemas.

El uso de IPM (*Integrated*

Power Module) permite que se eliminen los complicados e ineficientes circuitos "amortiguadores". Además, el circueteo de control (impulso de compuerta) del voltaje controlado IPM es mucho más simple.

El IPM es un conmutador de potencia electrónico que usa tecnología IGBT. Está diseñado como una unidad intercambiable con un peso de 4 kgs y consistente de los siguientes componentes:

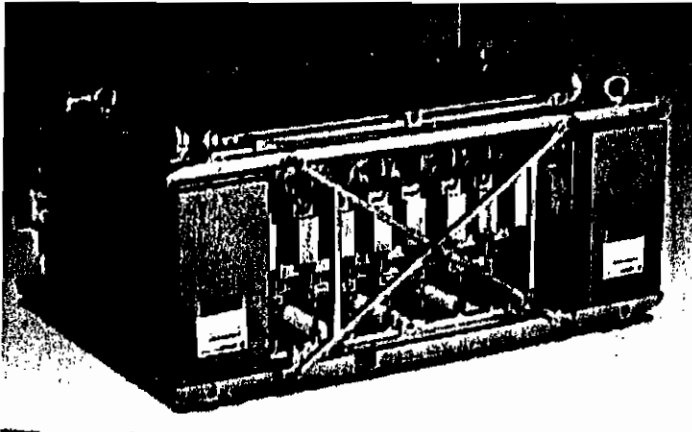


Fig. 53.- Módulo Convertidor MPC (ConMod).

- IGBT
- Diodo anti-paralelo.
- Enfriador por agua integrado.
- Contactos eléctricos enchufables para un rápido y simple cambio.
- Impulsor de compuerta para controlar el IGBT.

Es la capacidad de los IPM para conectarse en paralelo lo que permite hacer los convertidores con salidas de potencia por sobre los 3,5

MW. Se pueden implementar todos los voltajes de línea, incluyendo aplicaciones multisistemas y todas las topologías de impulsores. El espectro de aplicaciones de los MPC va de locomotoras eléctricas y diesel eléctricas a coches motrices de automotores eléctricos.

Aplicaciones en locomotoras incluyen la locomotora de demostración Adtranz 12X (15/25 kV c-a, 6MW en ruedas) tren alta velocidad Talgo, España, (350 km/h, 25 kV 50 Hz, 4 MW en ruedas, convertidor auxiliar 300 KVA integrado), locomotora GSRs, China, (25 kV

50 Hz, 4,8 MW en ruedas), y locomotora Shuttle del Eurotunnel, Francia/Reino Unido, (25 kV 50 Hz, 7 MW en ruedas).

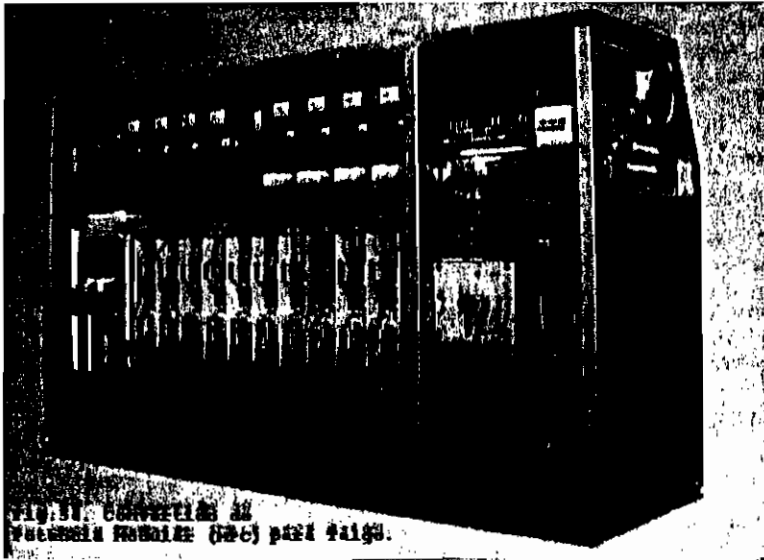


Fig. 53. Convertidor de potencia para Talgo.

En coches motores de automotores eléctricos se incluyen por ejemplo, los siguientes:

Ferrocarril Mittelthurgau (MThB) Suiza, (15 kV 16,7 Hz, 0,75 MW en ruedas), Ferrocarril Rorschach-Heiden (RHB), Suiza, (15 kV 16,7 Hz, 1 MW en ruedas), Ferrocarril Regional Linz (LiLo), Austria, (15 kV, 16,7 Hz y 750 V c-c, 0,75 MW en ruedas), y Chemin de Fer Yverdon - St. Croix, Suiza, (15 kV, 16,7 Hz, 0,75 MW en ruedas).

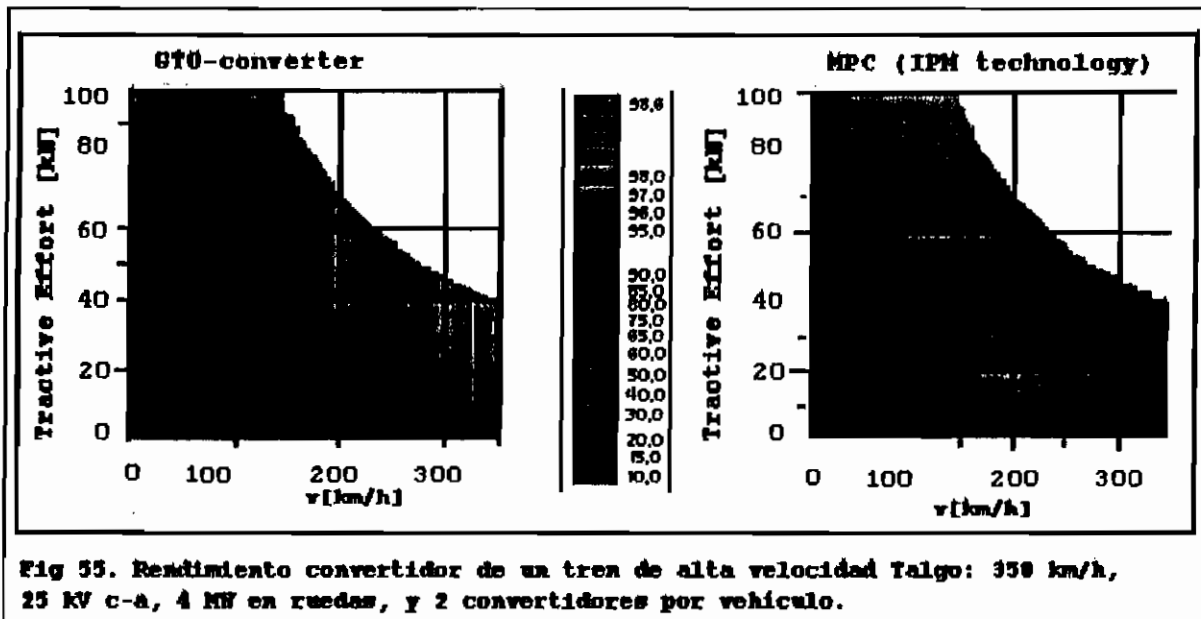


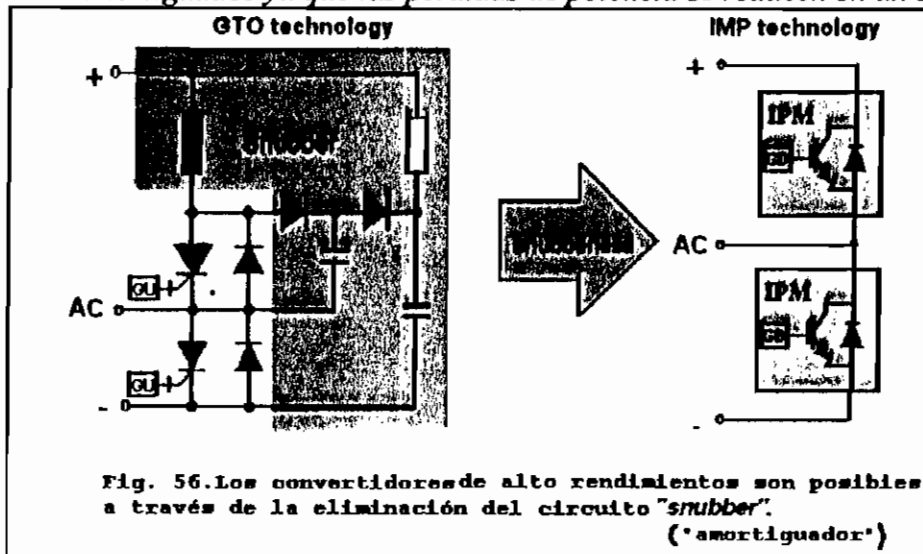
Fig. 55. Rendimiento convertidor de un tren de alta velocidad Talgo: 350 km/h, 25 kV c-a, 4 MW en ruedas, y 2 convertidores por vehículo.

También se ha desarrollado un módulo MPC compacto para montaje bajo piso y techo en aplicaciones de automotores. El Módulo Convertidor (Con_Mod), Fig. 53, es una unidad de cuatro fases con IPM, sensores de corriente y voltaje, condensadores, limitadores de corto circuitos, y barras de enlace c-c y cañerías de enfriamiento. El Con_Mod se puede usar en varios circuitos como convertidor de línea o motor para todos los sistemas de alimentación. La primera aplicación de esto fue en el Metro Bilbao, España.

Conclusión

Las principales características de la familia MPC, son:

- Claro mejoramiento del rendimiento comparado con convertidores amortiguados ya que las pérdidas de potencia se reducen en un 50 % en un



amplio rango de potencias, mientras en operaciones de carga parcial las pérdidas se reducen sobre el 85 %.

- Diseño modular con acceso total a los componentes.
- Diseño compacto y liviano.
- Escalamiento de potencia (conexiones en paralelo de IPM) permite adaptación de funcionamiento a las necesidades de los clientes, y
- Procedimientos simples y amigables hacia el usuario en reparaciones y mantención.

Estas características llevan a una reducción en los costos del ciclo de vida.

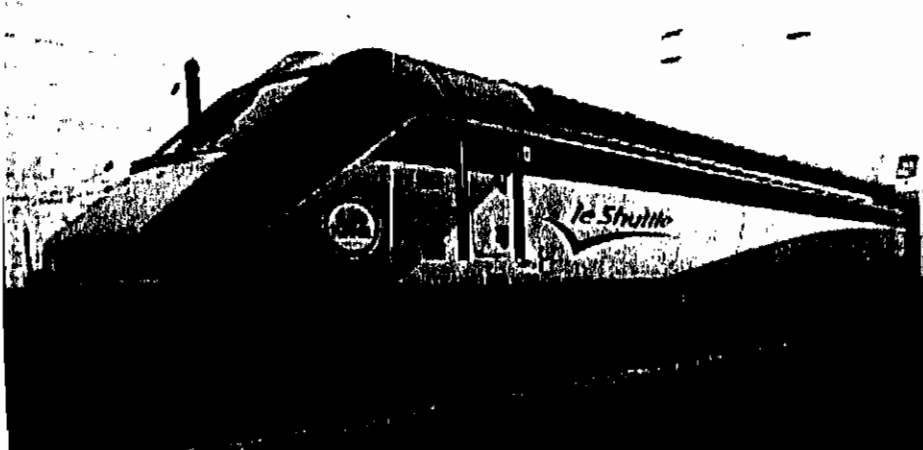


Fig. 57. Nueva serie locomotoras lanzadera de Eurotúnel equipadas con MPC.