

114
2020



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"FRENADO DE LOS TRENES ELECTRICOS".

T E S I S

Que para obtener el Título de:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

Presentan:

ABEL RANGEL BUCIO

FRANCISCO RIZO SANCHEZ

RICARDO MARTIN JURADO SILVEYRA

RICARDO DORANTES ESCAMILLA

Director:

BALTAZAR CHAVEZ ESPINO



MEXICO, D. F.

1992.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

CONTENIDO	PAGINA
I INTRODUCCION.	III
II CONCEPTOS Y PROBLEMAS DE LA ADHERENCIA EN EL FRENADO.	1
a) Definición	1
b) Influencia de la adherencia en el frenado.	9
c) Factores que benefician y/o deterioran la adherencia.	12
III NIVELES DE FRENADO DE ACUERDO A LA SITUACION DEL TREN.	26
a) Frenado de estacionamiento	26
b) Frenado de servicio	28
c) Frenado de seguridad	29
IV FRENADO MECANICO.	32
a) Principio de funcionamiento	33
b) Sistemas de frenado mecánico	36
1) Freno de disco	36
2) Freno de tambor	43
V SISTEMAS DE FRENADO ELECTROMAGNETICO.	45
VI SISTEMAS INDEPENDIENTES DE LA ADHERENCIA.	48

VII	FRENADO ELECTRICO.	54
	a) Introducción	54
	b) Freno dinámico o reostático	55
	1) Principio de operación	55
	2) Método y equipo de control	65
	c) Freno regenerativo	74
	1) Principio de operación	77
	2) Método y equipo de control	86
VIII	CONJUGACION DE FUNCIONAMIENTO ENTRE LOS SISTEMAS DE FRENADO ELECTRICO Y MECANICO.	101
IX	EVALUACION DE LOS TIPOS DE FRENADO.	106
X	CONCLUSIONES.	117
XI	BIBLIOGRAFIA.	120

INTRODUCCION.

En sus inicios el transporte ferroviario no alcanzaba altas velocidades como el actual, ni era de suma importancia el tiempo y distancia para lograr un alto total del vehiculo, como se requiere hoy en día con los trenes urbanos, los sistemas de frenado no eran tan complicados, sin dejar estos de ser importantes.

Con el paso del tiempo, los trenes urbanos y suburbanos han evolucionado tanto al grado de lograrse un frenado óptimo en cuanto a la seguridad y al confort, conjugandose en éste varios sistemas de frenado. Siendo éste el tema central del presente estudio, en donde se trata en primer término los conceptos y problemas de la adherencia en el frenado; posteriormente se exponen los diferentes modos de frenado para un vehiculo de acuerdo a su situación operante, se analiza también el freno mecánico desde un punto de vista superficial, no así para el frenado eléctrico en donde se analiza el comportamiento contrastante de los motores de tracción cuando éstos operan en sus dos modalidades; motor o generador.

Dentro del frenado eléctrico se estudian los temas de frenado reostático y regenerativo, exponiendose en un capitulo la conjugación de los sistemas de frenado eléctrico y mecánico.

Por último se hace una evaluación de los distintos tipos de frenado que se utilizan en los vehiculos ferroviarios.

CONCEPTOS Y PROBLEMAS DE LA
ADHERENCIA EN EL FRENADO.

DEFINICION: FRICCION.

La experiencia muestra que tratando de desplazar un cuerpo sobre otro, en el plano de contacto de los cuerpos surge una fuerza de resistencia a su deslizamiento relativo que se llama fuerza de fricción o rozamiento.

Esta fuerza es muy importante en la vida cotidiana. Por si sola hace que se detenga toda rueda que este en movimiento. La fricción produce el desgaste y la trabazón de las partes móviles. Por otra parte sin ella no seríamos capaces de caminar, no podríamos mantener un lápiz en nuestra mano y aún si lo hicieramos no podríamos escribir con él; el transporte rodante como lo conocemos, no sería posible.

Como se vera más adelante, la fricción desde el punto de vista microscópico, es un fenómeno muy complicado y las leyes de la fuerza de fricción por deslizamiento en seco son de caracter empírico y solo aproximadas en sus predicciones.

En la escala atómica, aún en la superficie más finamente pulida está lejos de ser plana. Por ejemplo la siguiente fig.1 muestra el perfil, muy aumentado de una superficie de acero conciderada como "muy pulida".

Se puede esperar que cuando dos cuerpos se colocan en contacto, el área real microscópica de contacto es mucho menor que el área aparente de contacto macroscópica.

La superficie real (microscópica) de contacto es proporcional a la fuerza normal, porque los puntos de contacto se deforman plásticamente bajo los grandes esfuerzos que sobre ellos se desarrollan. Muchos de los puntos de contacto llegan realmente a estar soldados en frío entre sí. Este fenómeno llamado adherencia superficial, se debe a que en los puntos de contacto, las moléculas de los lados opuestos de ambas superficies están tan cercanas entre sí, que ejercen fuerzas intermoleculares intensas unas sobre de otras.



Una vista muy amplificada de una sección de una superficie de acero muy pulida.

fig. 1

Cuando un cuerpo (por ejemplo un metal) se desliza sobre otro, la resistencia de fricción es debida a la ruptura de miles de pequeñas soldaduras, que se reproducen al ocurrir nuevos contactos casuales, tales como los que se muestran en la figura siguiente.

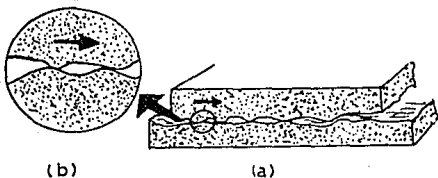


fig. 2

Por tanto la aparición de la fricción está condicionada ante todo, por la rugosidad de las superficies; que engendran una resistencia al desplazamiento, y principalmente por la presencia del fenómeno de adhesión entre los cuerpos oprimidos unos contra otros.

Los calculos de ingeniería se basan habitualmente en las leyes generales, establecidas experimentalmente que reflejan con una precisión suficiente para la práctica, las particularidades fundamentales del fenómeno de rozamiento.

Estas particularidades llamadas leyes del rozamiento o fricción se pueden enunciar de la siguiente forma:

- 1.- Al pretender desplazar un cuerpo sobre la superficie de otro, aparece en el plano de contacto una fuerza de rozamiento, cuya intensidad puede ser comprendida entre cero y el valor F_{lim} llamada fuerza límite de rozamiento.

La fuerza de rozamiento está dirigida en sentido opuesto a la dirección en que las fuerzas actuantes tratan de desplazar al cuerpo.

- 2.- La intensidad de la fuerza límite de rozamiento es igual al producto del coeficiente estático de rozamiento por la fuerza de presión normal a la reacción normal N.

$$F_{lim} = \mu_0 N$$

El coeficiente estático de rozamiento es un número abstracto que se determina experimentalmente y depende del material de los cuerpos en contacto, así como el estado de las superficies (carácter de elaboración, temperatura, humedad, lubricación, etc.)

- 3.- La intensidad de la fuerza límite de rozamiento no depende de las dimensiones de las superficies en contacto.

Reuniendo la primera y la segunda ley obtenemos, que en equilibrio la fuerza de rozamiento en reposo (la fuerza de adhesión) es:

$$F \leq F_{\text{lim}} \quad \text{o} \quad F \leq \mu_0 N$$

Una idea del valor del coeficiente de rozamiento para algunos cuerpos la muestran los datos expuestos a continuación:

Madera sobre madera	$\mu_0 = 0.4 - 0.7$
Metal sobre metal	$\mu_0 = 0.15 - 0.25$
Acero sobre Hielo	$\mu_0 = 0.027 - 0.03$

Todo lo dicho se refiere al rozamiento de deslizamiento en reposo. Durante el movimiento, la fuerza de rozamiento está dirigida en dirección opuesta al movimiento y equivale al producto del coeficiente dinámico de rozamiento por la fuerza de presión normal.

$$F = \mu N$$

El coeficiente dinámico de rozamiento de deslizamiento es también un número abstracto y se determina experimentalmente. El valor del coeficiente depende no solamente del material y del estado de las superficies, sino en cierta medida, de la velocidad del movimiento de los cuerpos. En la mayoría de los casos, si la velocidad aumenta, el valor de μ disminuye un poco al principio, pero luego se queda casi constante.

ROZAMIENTO DE RODADURA.

El rozamiento de rodadura es la resistencia que surge al rodar un cuerpo sobre la superficie de otro.

Examinemos un cilindro de radio R y de peso P que descansa sobre una superficie rugosa horizontal. Apliquemos al eje del cilindro una fuerza Q fig. A menor que F_{lim} entonces en el punto A, surge una fuerza de rozamiento F numéricamente igual a Q , que se opondrá al deslizamiento del cilindro sobre la superficie.

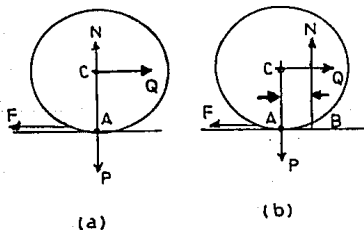


fig. 3

Si se considera que la reacción normal N está aplicada también en el punto A, entonces ella equilibrará la fuerza P y las fuerzas Q y F formaran un par que producirá el rodamiento del cilindro. En tal situación el rodamiento debe empezar, como se ve bajo la acción de la fuerza Q por muy pequeña que esta sea.

La experiencia muestra que todo ocurre de otro modo. Esto se explica porque en realidad como resultado de una deformación de los cuerpos, estos hacen contacto a lo largo de cierta superficie AB (fig. B). Durante la acción la fuerza Q, la intensidad de las presiones disminuye cerca del borde A y crece cerca del borde B. Por lo tanto, la reacción N se encuentra desplazada hacia el lado en que actúa la fuerza Q. Con el aumento de la fuerza Q este desplazamiento aumenta hasta una magnitud límite K, entonces en la posición límite, sobre el cilindro actuara el par (Q, F) de momento

lim

$Q_{lim} R$ y el par (N,P) de momento NK que equilibrara al

primero. De la igualdad de los momentos hallamos que :

$$Q_{lim} R = NK \quad \text{ó} \quad Q_{lim} = \frac{K}{R} N$$

hasta que $Q < Q_{\text{lim}}$, el cilindro está en reposo; cuando

$Q > Q_{\text{lim}}$, empieza el rodamiento.

La magnitud lineal K que entra en la fórmula anterior se llama coeficiente de rozamiento de rodadura. Esta magnitud se mide habitualmente en cm, el valor del coeficiente K depende del material de los cuerpos y se determina experimentalmente.

A continuación se citan los valores de este coeficiente para algunos materiales:

Madera sobre madera $K = 0.05 - 0.08$ cm.

Acero suave sobre acero (rueda sobre riel). . $K = 0.005$ cm.

Acero templado sobre acero (cojinete de bolas) $K = 0.001$ cm.

La relación K/R para la mayoría de los materiales, es mucho menor que el coeficiente de rozamiento estático. Por eso en la práctica, cuando hay posibilidad, se trata de sustituir el deslizamiento por el rodamiento (ruedas, cilindros, cojinetes, etc.).

INFLUENCIA DE LA ADHERENCIA EN EL FRENADO.

En un sistema de frenado, sea a través de fricción o eléctrico, la adhesión rueda riel determina la primera y más importante restricción.

Aparte del frenado por inducción magnética o patin magnético, todas las demás formas dependen de la transmisión de sus esfuerzos retardadores, a fin de cuentas fricción rueda riel.

La deceleración máxima de un vehículo es, de acuerdo con la segunda ley de Newton:

$$a = \frac{F}{m}$$

Donde: F = máxima fuerza aplicable.

m = masa de inercia del vehículo.

a = aceleración.

Suponiendo una fuerza de freno grande, el factor que nos limita la fuerza de deceleración es la adherencia rueda-riel, que se define como la máxima fuerza aplicable en el plano de contacto rueda-riel dividida por la normal:

$$\mu = \frac{F}{N}$$

pero:

$$N = mg \quad \text{por lo que}$$

$$a = \mu \cdot g$$

Luego la adherencia limita la deceleración de un vehículo.

Como se acaba de concluir, la adherencia rueda-riel determina el esfuerzo de frenado o de tracción que puede transmitirse en el plano de contacto rueda-riel. Es por lo tanto fundamental para la rentabilidad de la carga útil transportable por una locomotora y para la rentabilidad de un determinado tramo de vía dada por la frecuencia de trenes que depende a su vez de las distancias de parada.

Durante el frenado, si se permite a una rueda deslizar hay dos consecuencias no deseadas:

1.- Planos ó achatamientos y daños térmicos, que llevan a pérdidas, de material y, en última instancia a reducir la calidad de la rodadura.

2.- Las distancias de parada aumentarán, ya que la adherencia en el deslizamiento es normalmente más baja que con deslizamiento controlado. (ver figura 4).

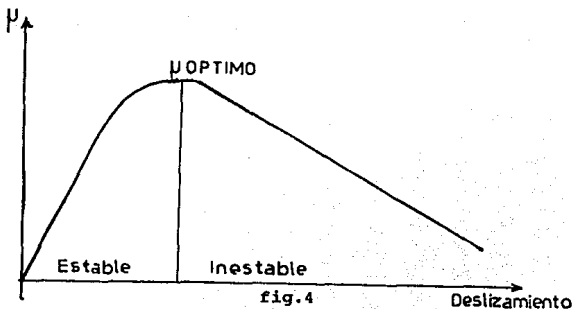


fig.4

Si se producen deslizamientos altos, las tensiones térmicas que resultan combinadas con las de rodadura pueden producir exfoliaciones en la superficie de rodadura. Debe indicarse que no es esta la única ni la más frecuente causa de exfoliaciones.

En caso de deslizamientos considerables, en que las temperaturas son lo suficientemente altas como para penetrar en la rueda y crear un volumen significativo de martensita en el material base, puede producirse roturas ó desprendimiento de esta martensita.

Idealmente, para evitar la formación de martensita, deberían evitarse temperaturas por encima de la transformación, es decir, 900° C. En la práctica, con evitar la penetración (limitando la duración del ,deslizamiento) se puede evitar las grietas y exfoliaciones.

FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA ADHERENCIA.

La adherencia rueda-riel depende de una forma compleja de los contaminantes presentes en la superficie de rodamiento rueda-riel, movimiento relativo de rueda-riel y velocidad del vehículo.

CONTAMINANTES.

Las superficies de contacto son en general contaminadas por oxidos metalicos, las peliculas de fluido; agua, aceite, vapor de agua (rocio, escarcha) y materias organicas tales como las hojas de los arboles.

Esta contaminación superficial crea el efecto de disminuir el coeficiente de adherencia y esta reducción hace que se alcancen valores de 0.1 y hasta menores en ciertos casos, (los valores del coeficiente de adherencia obtenidos sobre las locomotoras a velocidades muy bajas son de alrededor de 0.4).

Falta distinguir los casos de contaminación localizada como el aceite y las hojas muertas, de éstos, que son muy pocos estan localizados aleatoriamente sobre toda la longitud de la vía. En estos casos el coeficiente es mucho mas bajo que para un riel humedo.

El coeficiente de adherencia puede ser restablecido a un valor correspondiente del de un riel seco por medio de la utilización del enarenamiento.

El mejoramiento de la adherencia rueda-riel ha sido el objeto de numerosas investigaciones teniendo como finalidad la limpieza de las superficies de contacto.

El enarenamiento es un sistema muy difundido por ser eficaz y relativamente simple de poner en practica. Este permite que un riel aceitoso o humedo reencuentre el coeficiente de adherencia en un riel seco. Este consiste en inyectar la arena entre la rueda y el riel por medio del siguiente sistema:

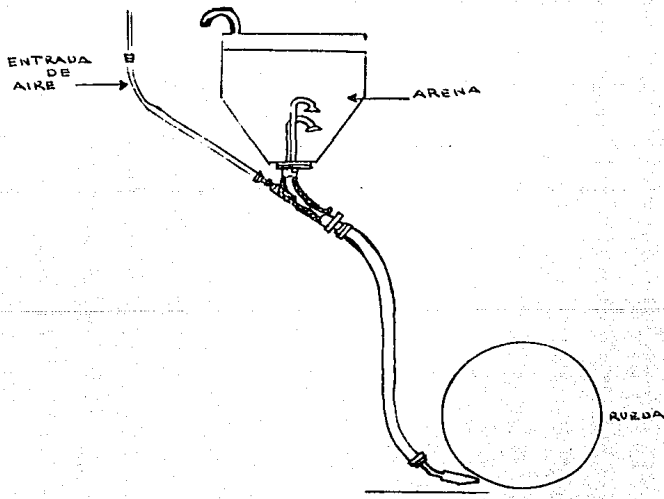


fig. 5

El número y calibración de los sistemas de enarenamiento dependen evidentemente de las condiciones en general, el enarenamiento de los ejes delanteros es suficiente para un servicio normal.

Otros métodos de mejorar la adherencia son citados solo como referencia, debido a que con ellos se obtienen resultados interesantes pero diferentes a los obtenidos por enarenamiento, ellos son en general difíciles en cuanto su aplicación.

Como tal es el caso de los agentes limpiadores compuestos de solventes y abrasivos, los cuales proporcionan resultados que son en general menos buenos que los obtenidos por el de enarenamiento.

Otro caso es el del sistema de limpieza mecánica del riel, con un sistema de cepillos giratorios acompañados de una protección de fluido abrasivo, pero éste es difícil de instalar y los resultados no son tan buenos como el del uso de arena.

DESLIZAMIENTO RELATIVO RUEDA-RIEL.

Aunque no hay acuerdo respecto a la terminología utilizada, se usaran las siguientes definiciones para los distintos grados de deslizamiento rueda-riel:

- El contacto de rodadura entre rueda y riel no puede transmitir esfuerzos longitudinales. Por lo que para que ocurran procesos de tracción o de frenado, debe incluirse algún movimiento relativo.

- Patinaje: se induce cuando las fuerzas resistentes no pueden igualar el esfuerzo longitudinal en tracción.

- Deslizamiento: es el resultado de sobrepasar el esfuerzo de frenado a las fuerzas resistentes, y por tanto, se induce un movimiento relativo entre rueda y riel en toda el área de contacto.

- Bloqueo: Ocurre al frenar, cuando una rueda cesa de girar y el vehículo sigue en movimiento.

VELOCIDAD DEL VEHICULO.

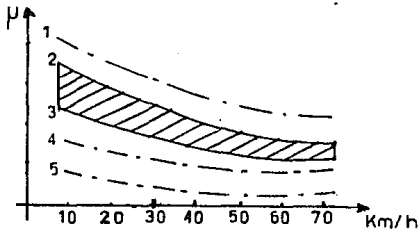
La adherencia disponible al frenar o traccionar es una función compleja del vehículo, geometría del riel y velocidad del vehículo. Varía debido a irregularidades de longitud de onda muy larga. El hacer un modelo de este sistema, incluyendo las variables estocásticas y paramétricas, es prácticamente imposible.

Sin embargo, es claro que la adherencia disminuye al aumentar la velocidad, como puede verse en la gráfica siguiente.

Fig.6 Coeficiente de adherencia en función de la velocidad para vehiculos frenados através de la rueda.

- 1.- Carril seco-límite superior.
- 2.- Carril seco-límite superior más frecuente.
- 3.- Carril húmedo-límite superior más frecuente.
- 4.- Carril húmedo-límite inferior.
- 5.- Hojas húmedas

▨ 85 % de todas las relaciones.



CONTROL DE DESLIZAMIENTO.

Los primeros sistemas de protección de anti-deslizamiento eran mecánicos o eléctricos y se basaban en un controlador actuado por deceleración excesiva, para aflojar los frenos.

La segunda generación se basaba en electrónica de estado sólido y eran por tanto capaces de responder de una forma más flexible a una variedad de parámetros más amplios, tal como el deslizamiento de rueda (por ejemplo distintos valores de deceleración de rueda) y conseguir una cierta adaptación fija a la adherencia reducida.

La tercera generación de equipos está basada en tecnología de microprocesador. El equipo de control de deslizamiento por microprocesador permite un control adaptativo del freno para maximizar el uso de la adherencia disponible. El equipo detecta si la adherencia está creciendo, disminuyendo o permaneciendo constante durante el deslizamiento, vigilando la aceleración y deceleración instantánea de la rueda. Esta sencillez permite al sistema anticiparse a la recuperación de velocidad de la rueda, y evitar un aflojamiento innecesario de los frenos si la adherencia crece lo suficiente como para soportar la exigencia del freno.

CONTROL DEL ANTI-DESLIZAMIENTO POR MICROPROCESADOR.

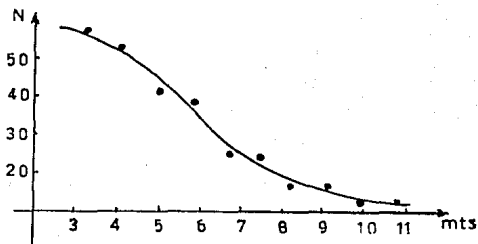
Los fenómenos de adherencia rueda-riel en vehículos ferroviarios se han considerado desde siempre como extremadamente complejos y aleatorios. El desarrollo de tecnología electrónica avanzada y más recientemente el microprocesador ha permitido el desarrollo de algoritmos que pueden interpretar en tiempo real las condiciones rueda-riel y efectuar un control del sistema de freno en tiempo real con el fin de optimizar las distancias de parada por medio de un aflojamiento controlado de los frenos en caso de bajas condiciones de adherencia.

Para controlar el deslizamiento con efectividad, es necesario conocer con cierta precisión la velocidad y aceleración de cada rueda y la velocidad del vehículo. Con éste se puede modular el esfuerzo de frenado para cada bogie ó eje.

Para poder desarrollar una lógica efectiva es necesario reconocer las limitaciones fundamentales en la medición de la velocidad y los problemas creados por los cambios aleatorios de la adherencia:

-Hay requisitos determinantes para el control, ya que como se ve en la fig . 6 , y en la siguiente, la adherencia puede sufrir cambios relativamente rapidos dependiendo del grado de deslizamiento ó variaciones aleatorias dependientes de las condiciones de la pista de rodamiento.

Número de sucesos.



Distancia (en mts.) con adherencia constante.

Fig.7 Variabilidad de la adherencia con la distancia.

- Parámetros variables: carga por eje, rozamiento de las zapatas, exigencia del freno. A los cuáles el sistema de anti-deslizamiento debe adaptarse automáticamente.

- Errores en la conversión y tratamiento de la señal de los generadores, que pueden ser del tipo sistemático ó aleatorio y que deben ser aceptados y tomados en cuenta en el diseño de la lógica del sistema.

**COMPOSICION Y FUNCIONAMIENTO
DEL SISTEMA DE ANTI-DESLIZAMIENTO.**

Cuando una rueda desliza y se excede la adherencia máxima admisible, debe aflojarse parcial ó totalmente el freno para permitir la aceleración de la rueda. El deslizamiento debe reducirse lo suficiente como para que la siguiente aplicación de freno tenga lugar con la adherencia creciente (zona estable de la fig. 4).

El sistema de antideslizamiento forma en conjunto con el freno un circuito de lazo cerrado. En la figura 8 se muestra en forma de un diagrama a bloques, el control de lazo (referido a un eje).

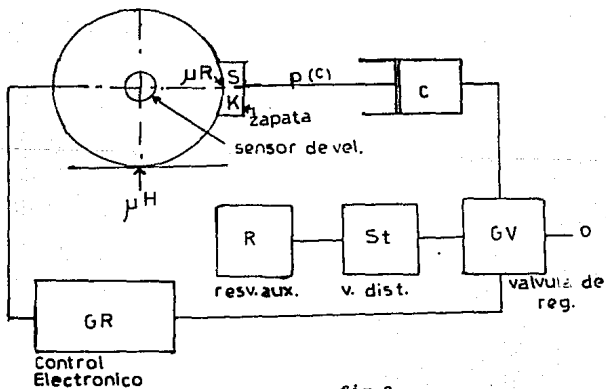


fig.8

El sensor de velocidad (ver fig. 9) detecta la velocidad rotacional de las ruedas por medio de un entrehierro, formado por un engrane ferromagnético y el sensor, evitando así algún tipo de desgaste. El sensor transmite una señal de voltaje sinusoidal AC de pequeña amplitud a un transmisor amplificador y éste la envía en forma de pulsos rectangulares a la Unidad De Control Electrónica. Aquí después de ser evaluada la velocidad y la aceleración, la señal de cada válvula se actualiza, ésta señal puede corresponder a una de las siguientes cinco alternativas:

- 1.- No varía la orden de freno.
- 2.- Aplicación escalonada hasta el límite de la orden de freno.
- 3.- Mantener la presión a un valor fijo.
- 4.- Aflojamiento escalonado.
- 5.- Aflojamiento continuo.

La orden de cada válvula se actualiza aproximadamente cada 100 ms. Esto es consecuencia de la necesidad de un compromiso entre la velocidad de respuesta necesaria para evitar cambios importantes de velocidad de las ruedas antes de la siguiente evaluación y la necesidad de una medición precisa de la velocidad, aceleración y sobreaceleración de la rueda.

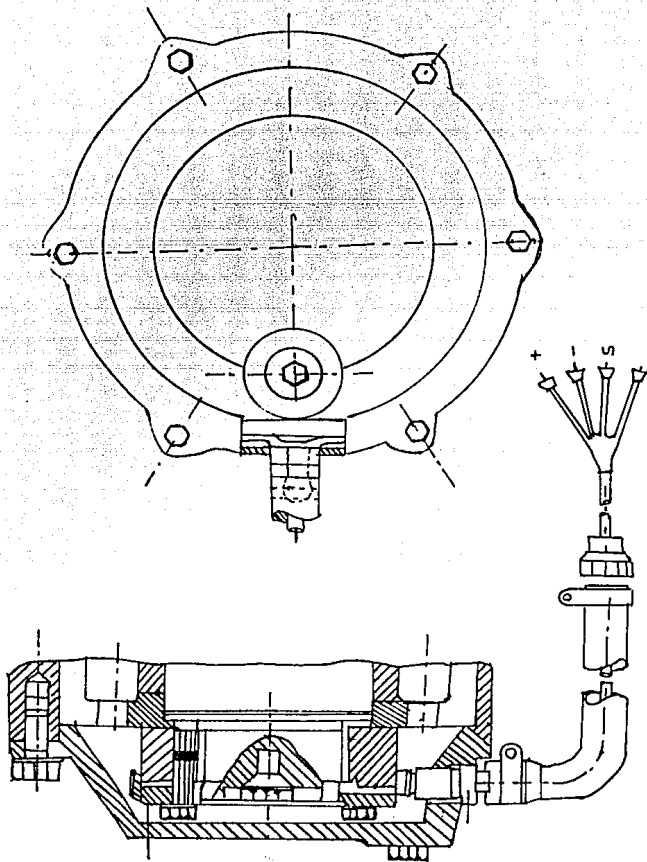
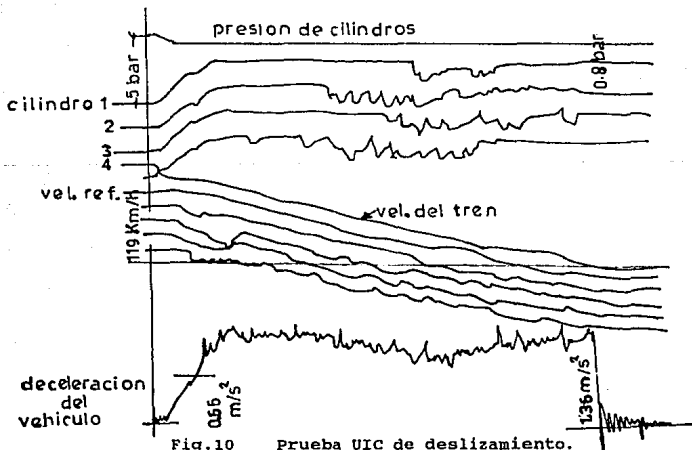


fig. 9
SENSOR DE VELOCIDAD

En la fig.10 se muestran los resultados de las pruebas realizadas por Knorr Bremse Corporation. Para demostrar la efectividad del control de anti-deslizamiento, utilizando un sistema con microprocesador.

Los resultados fueron tomados de un vehículo convencional de pruebas de 4 ejes. Los registros se tomaron a "coche lanzado" desde una velocidad inicial de 120 km/hr. Se rociaron ambos rieles con una solución de agua y jabon standard segun normas UIC (Unión International the Chemin of Fer) se sobrefreno el vehículo a un 50% para demostrar la capacidad del equipo de controlar el deslizamiento en el campo óptimo.



Observando el registro de izquierda a derecha, el primer punto de interés está en la deceleración del vehículo. Se aprecia un pico de 0.66 mts/seg. con todas las ruedas deslizando. El microprocesador respondió manteniendo la presión de los cilindros y no bajandola. Al aumentar el deslizamiento, creció la adherencia y la presión aumento por escalones, en éste momento se establece la máxima presión con un deslizamiento del 10 al 20%. La deceleración aumento hasta cerca de 1.3 mts/seg.². Cabe observar que el deslizamiento se mantiene estable con tendencia a reducirse.

El primer deslizamiento tuvo lugar en el eje cuatro, al ser la resapuesta más rápida éste aumento muy poco y la velocidad volvió rapidamente al rango programado. La presión aumento por escalones para aprovechar el coeficiente de adherencia más alto.

Hubo deslizamientos aleatorios durante casi toda la frenada. Es interesante señalar que el ultimo tuvo lugar sobre los 10 km/hr. y la presión se aplico totalmente antes de que el vehículo parase.

En una observación detallada de la presión de los cilindros pueden verse las funciones de frenado y aflojamiento por escalones, también hay casos e: que se mantiene la presión.

La línea llamada "velocidad de referencia" muestra la velocidad de referencia calculada por el microprocesador.

Comparando ésta con la de los ejes se ve como la V_{eje} , velocidad del eje más alta actualiza la de referencia, de manera que la diferencia entre ésta y la real del vehículo es muy pequeña.

Después de muchas tandas de pruebas similares numerosos sistemas ferroviarios europeos y corporaciones internacionales como la UIC han demostrado que ésta tecnología mejora sistemáticamente el aprovechamiento de la adherencia en el frenado entre un 30 y 50% con respecto a la tecnología anterior.

Como una conclusión particular sobre éste sistema se puede decir que ésta tecnología está permitiendo, que las locomotoras arrastren cargas mayores. Las mejoras efectuadas en el comportamiento del freno son claras, aunque se necesitara tiempo y experiencia antes de que los ferrocarriles puedan aprovechar con seguridad las ventajas que supone ésta mejora, reduciendo las distancias en la señalización ó aumentando velocidades por encima de los sistemas vigentes.

MODOS DE FRENADO DE ACUERDO A LA SITUACION DEL TREN.

Llamese frenado a todo aquel mecanismo del material movil cuya finalidad exclusiva es la de reducir la velocidad del vehiculo ya sea parcial o totalmente.

Para su detención hay diferentes formas que son:

- Frenado de estacionamiento.
- Frenado de servicio.
- Frenado de urgencia.

FRENADO DE ESTACIONAMIENTO.

Este modo de frenado se utiliza exclusivamente para mantener inmóvil un vehiculo, existiendo dos formas de lograr esto:

- Con tren encendido - (stand by ó preparado).
- Con tren apagado.

En tren encendido, se utiliza el mismo sistema electromecánico que cuando se esta dando servicio.

Basandonos en la figura siguiente:

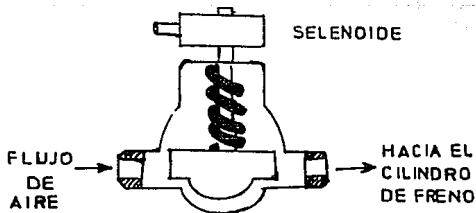


Fig. 11

Se observa una electro válvula de funcionamiento inverso, la cual tiene la función de comandar un grado de frenado máximo, cuando no exista corriente en su respectiva bobina debido a la ausencia de algún modo de conducción.

Como se observa en la fig. 11 cuando no existe corriente se tendrá una presión máxima regulada en el cilindro de frenado con lo que garantiza un frenado de estacionamiento.

Con tren apagado este frenado es totalmente mecánico y se logra a través de un mecanismo de engranaje que es asociado por una manivela, con el accionamiento de ésta se consigue que las zapatas bloqueen las ruedas.

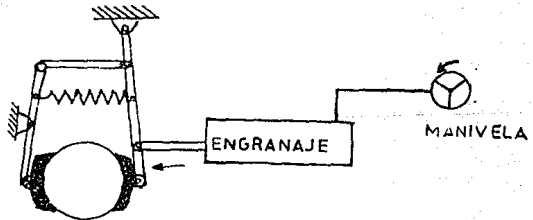


Fig. 12

FRENADO DE SERVICIO.

El poder parar el vehiculo en la estación y mantenerlo inmóvil (aún en pendientes), debe ser económico para la infraestructura y para el vehículo, ya que es el que con más frecuencia se utiliza pero su utilización esta programada.

El mejor sistema de frenado es el de freno eléctrico (reostático o regenerativo). Cualquiera puede ser utilizado en el frenado de servicio por ser el que menor perjuicio causa a todos los elementos del sistema de transporte.

El frenado eléctrico es eficaz practicamente hasta la detención del vehículo. Sin embargo cuando ya va a muy baja velocidad y para obtener el paro completo entra en acción el frenado neumático. Es más eficaz para la detención total pero es más perjudicial para las partes de rodamiento que están en fricción. Sin embargo con este frenado se tiene un poco más de adherencia entre las ruedas y la superficie de rodamiento.

Con la combinación del frenado eléctrico y el neumático se puede obtener un mejor confort para los pasajeros en el frenado de servicio.

FRENADO DE SEGURIDAD.

El valor de la deceleración necesaria en frenado de seguridad está limitada por el tipo de freno utilizado y por los coeficientes de adherencia que se tengan.

En el frenado de seguridad no debe ser sin embargo demasiado fuerte para que pueda ser soportado sin causar daños al carro, ni molestias a los pasajeros transportados. La deceleración permisible se sitúa generalmente alrededor de 1.2 a 1.5 m/seg² pero en algunos casos puede ser hasta de 2m/seg².

Esta deceleración óptima de 1.2 a 1.5 m/seg² se puede obtener bajo las siguientes condiciones: en terreno horizontal, línea recta y a velocidad límite.

En el caso de pendientes o de superficies con mala adherencia no será posible obtener este valor óptimo ni tampoco se puede obtener la velocidad máxima para conservar la misma distancia de frenado.

En la fig. 13 se muestran las curvas de la variación de la distancia de frenado, que se obtienen a partir de una velocidad dada para obtener diferentes deceleraciones. Estas curvas son establecidas para un solo vehículo, utilizándose la ecuación:

$$d = \frac{v^2}{2\gamma} + t \frac{v}{o} + L$$

DONDE:

- γ .- Deceleración de frenado.
- t_o .- Tiempo de respuesta del freno.
- L .- Distancia mínima entre los dos extremos de los trenes que se siguen.
- V .- Velocidad.

En esta ecuación se toma en cuenta, que se tiene un tiempo de respuesta para el sistema de frenado de un segundo como máximo, esto para el caso general en que se tengan materiales nuevos, pocos vehiculos y con sistema de frenado electroneumático.

Si por ejemplo arrancamos un vehiculo y queremos que sea sometido a una deceleración de 1.5 m/seg^2 máximo para una velocidad de 70 Km/h. este se detendra aproximadamente en 145 metros.

Si quisieramos que el vehiculo se detuviera en la misma distancia pero aplicando una deceleración de 1.2 m/seg^2 la velocidad del vehiculo debera ser aproximadamente de 63 Km/h.

Se recomienda no exceder el valor de 1.5 m/seg^2 de deceleración para que no se lleguen a dañar las zapatas del freno mecánico.

RELACION VELOCIDAD - DISTANCIA PARA
DIFERENTES DESACELERACIONES.

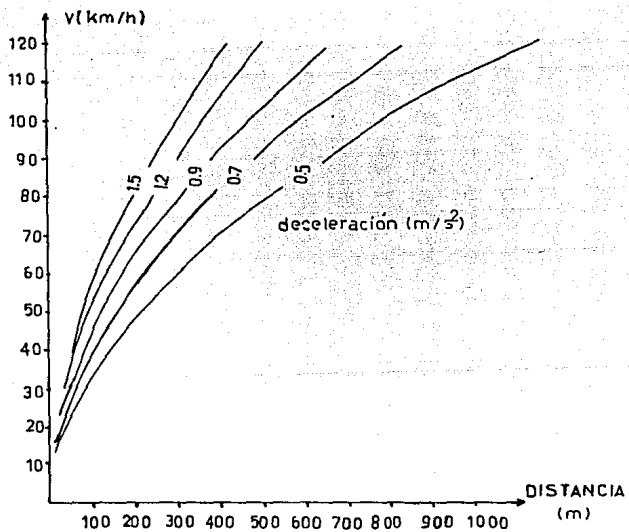


Fig.13

FRENO MECANICO.

PRINCIPIO:

Son dispositivos de fricción empleados para regular el movimiento de los cuerpos (retardandolos, manteniendolos constantes en su velocidad ó manteniendolos en reposo).

La capacidad de un freno depende de la presión unitaria sobre la superficie de frenado, del coeficiente de fricción y de la capacidad del freno para disipar el calor equivalente a la energía que se esta absorbiendo.

Si se emplea un freno sobre un cuerpo móvil, produce una reducción de la energía cinética teniendo como consecuencia un aumento de la energía interna de los cuerpos en contacto.

Esto quiere decir que la temperatura de los cuerpos en contacto aumenta; como resultado del trabajo de fricción que eventualmente se disipa como calor en el ambiente ó en los cuerpos circundante.

La disipación de la energía como calor requiere de un tiempo, por esta razón la capacidad de un freno se suele especificar en función de la cantidad de trabajo de rozamiento μ , que puede absorber en un tiempo determinado.

Algunas veces tiene que ser aplicado un freno constantemente en periodos largos y en este caso el freno debe ser capaz de radiar y transmitir el calor por convección a la atmosfera.

Algunas otras veces el freno se aplica durante intervalos cortos de tiempo intermitentemente, con tiempo suficiente entre las aplicaciones para que se enfrien hasta un valor próximo al de la temperatura ambiente, en estos casos se puede absorber energía en su mayor parte por calentamiento en las partes metálicas.

La eficiencia del freno puede disminuir considerablemente poco despues de que comienza a actuar continuamente.

Esto se debe principalmente a una disminución importante del coeficiente de fricción y a las altas temperaturas en las superficies de contacto.

PRINCIPIO Y FUNCIONAMIENTO.

Es el sistema más utilizado tanto en trenes como en otro tipo de vehiculos, el cual utiliza zapatas para su frenado.

Para su funcionamiento, se pone en contacto la rueda y unas zapatas produciendosa un esfuerzo retardador, que es el producto del frotamiento entre ambos cuerpos.

En el frenado se aplicara un esfuerzo a las zapatas por medio neumático o eléctrico, el cual se transmitira a la rueda para su detención.

Su coeficiente de rozamiento μ varía con la velocidad y el esfuerzo unitario, como se ve en la gráfica de la fig. 14

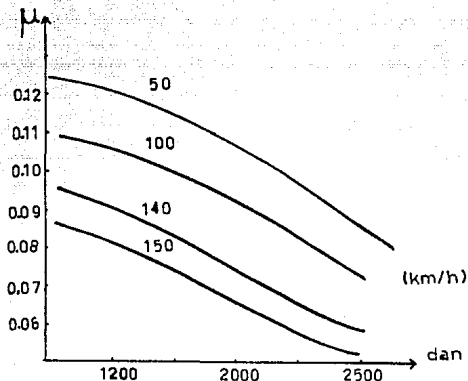


fig. 14

Este coeficiente varía con la presencia de la humedad. Los dispositivos que generan el esfuerzo de frenado sobre las zapatas son de dos tipos, neumático y electroneumático. fig.15a y 15b.

Estos sistemas utilizan el aire comprimido para su funcionamiento, el cual será proporcionado por medio de un compresor de aire.

FRENO DE ZAPATA

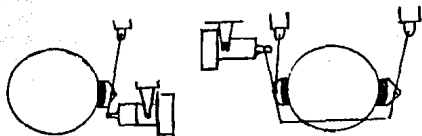


fig. (a)

SISTEMA NEUMATICO

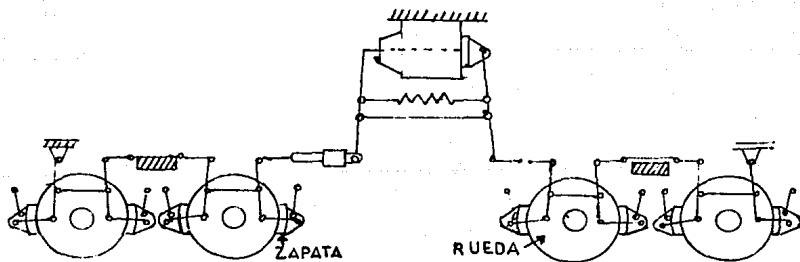


FIG. 15

SISTEMAS DE FRENADO MECANICO.

FRENO DE DISCO.

El freno de disco ofrece numerosas ventajas en comparación con el freno de zapata:

- Deceleración constante, también en caso de velocidades elevadas.
- Tiempos de reacción más cortos y distancia de frenado más corta.
- Larga duración del disco de fricción y de la guarnición de la mordaza de freno (varias veces más que con zapata).
- Mayor duración de la rueda, ya que la superficie de rodadura solo es sometida al rodaje.
- Mando neumático sencillo, por consiguiente ahorro de espacio y peso.
- Consumo de aire reducido.
- Poco ensuciamiento de los vehículos e instalaciones por polvo de desgaste.
- Más confort por frenado suave y poco ruido (sin empujón de parada).

Debido a estas ventajas, el freno de disco se emplea cada vez más, sobre todo en caso de vehículos rápidos con grandes cargas por eje.

Para una suficiente refrigeración de los discos de fricción se han provisto de aletas de refrigeración dispuestas radialmente entre las superficies de fricción.

Estas aletas, en dependencia de la velocidad, transportan por la fuerza centrífuga un corriente de aire de refrigeración desde el cubo, a través del interior del disco de fricción, al exterior.

Los discos de fricción son fabricados bien de una sola pieza o bien con ejecución partida. En este último caso, los dos segmentos del disco de fricción son unidos entre sí por dos tornillos pasantes calibrados.

FRENO DE DISCO
DE FUNDICION GRIS

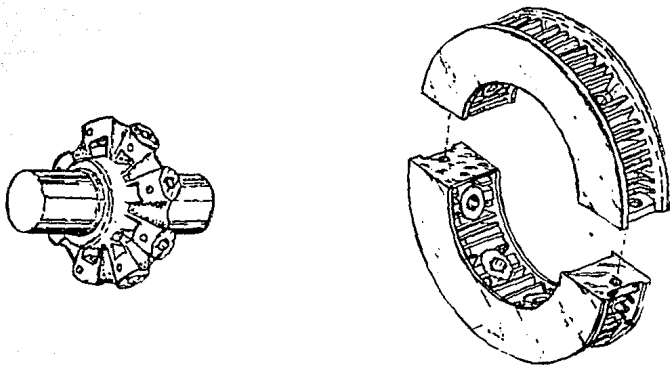


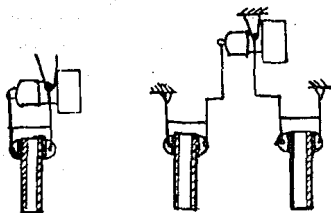
fig 16

La experiencia en el sector de los frenos de disco ha mostrado que para el disco de fricción la fundición gris, debido a sus características físicas, mecánicas y tecnológicas, es más apropiada que la fundición de acero en lo que se refiere a su resistencia al desgaste y a roturas así como a su comportamiento en caso de cambios bruscos de la temperatura.

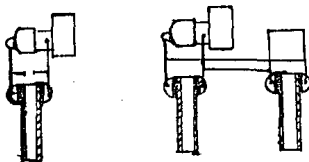
La fundición gris es ideal para la fricción con los materiales de guarnición empleados hoy en día. Puntos calientes y puntos de soldadura no se presentan con fundición gris ni aún en caso de humedad.

Estas ventajas de los discos de fricción de fundición gris se aprecian sobre todo en caso de velocidades de marcha de más de 120 Km/h. Por ello todos los coches de viajeros de los ferrocarriles alemanes están equipados con discos de freno de eje de fundición gris.

FRENO DE DISCO



PUNTO FIJO



PUNTO FLOTANTE

Fig. 17

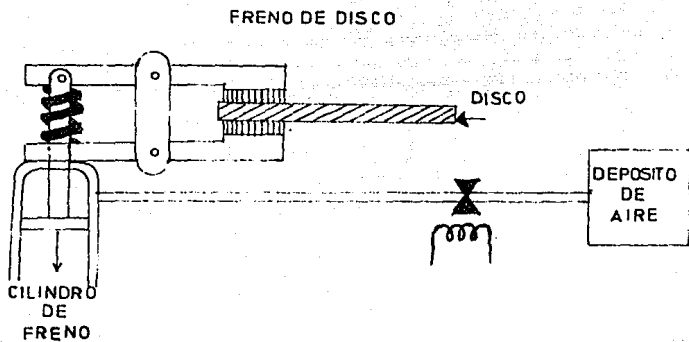


Fig. 18

COMPOSICION DE ZAPATAS.

El material usado en las zapatas es una composición de fibras, mallas de asbesto, aleaciones de metal y madera tratada, que constituyen un excelente material para frenar.

La conductividad térmica de las aleaciones de metales es bastante buena como el aluminio que es dos veces mayor que otros metales como el hierro o el acero que es el más empleado, por lo que la energía que se genera por rozamiento entre las superficies en contacto se disipan rápidamente al ambiente o en las partes metálicas.

Las piezas de frenado estan sometidas a gradientes de temperatura frecuentemente altas hasta su límite de capacidad.

Las capas más calientes son las que dilatan las zapatas, por lo que dentro de un tambor sus paredes estan sometidas a tensión y las exteriores a compresión.

Si el gradiente de esfuerzos excede los valores de la resistencia de fluencia a su temperatura de funcionamiento el resultado seran deformaciones en las zapatas permanentemente.

Si la fluencia se produce en las partes interiores, los esfuerzos son invertidos después de que alcanza nuevamente la temperatura ambiente ó sea que se origina una tensión interior y una compresión exterior.

Los tambores de freno que han sido sometidos a ciclos severos de este tipo presentan evidentemente "grietas por temperatura", que puede conducir a una rotura por fatiga.

En la fabricación de las zapatas se utilizan varios materiales, la mayoría de ellos son algunas mezclas y aglomerados moldeados, con o sin alambre, pedacitos de metal y polvo metálico.

La finalidad del metal es incrementar la conducción del calor, que suele ser cobre o latón.

Para temperaturas altas (por encima de los 200° C) y cargas pesadas se emplean forros metálicos, a base de cobre o hierro con plomo, estaño y/o sílice en la mezcla, para absorber más rápidamente la energía disipada por el tambor.

Para temperaturas de los 400° C a los 540° C se emplean mezclas sinterizadas que contienen materiales cerámicos.

En el caso de las zapatas de madera se requiere que sean tratadas por impregnación de aceite de cacahuete para evitar ruidos anormales y por ignifugación con sal de oxileno para evitar su carbonización, por efecto de la elevada temperatura generada por la acción del frenado.

Este tipo de zapata se utiliza frecuentemente por tener características superiores a las zapatas de composición como se indica:

- Las zapatas de madera no emiten chispas nocivas para los sistemas electricos-electrónicos del tren y de la via.
- El nivel de ruido producido es conciderablemente más bajo.
- El desgaste de las ruedas es menor.
- Se logra mejor confort, ya que mantiene más uniforme la deceleración del tren.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE AMBOS SISTEMAS.

FRENO MECANICO SOBRE RUEDAS.

- DESVENTAJA.- Desgaste rápido de las zapatas, poca eficiencia en grandes velocidades y desgaste en las partes de rodamiento.

FRENADO SOBRE DISCOS.

- VENTAJAS.- Deceleración constante, en caso de velocidades elevadas.

- Larga duración del disco de fricción, mayor duración de la rueda, ya que la superficie de rodadura solo está sometida al rodaje.

- Poco ensuciamiento en el disco y más confort por frenado suave y poco ruido.

- Mando neumático sencillo y poco consumo de aire.

- DESVENTAJA.- El frenado va a depender de la limpieza de la cubierta de la rueda.

FRENO ELECTROMAGNETICO ATRAVEZ DE PATINES.

PRINCIPIO:

El esfuerzo es aplicado por medio de frotamiento que es obtenido por medio de atracción electromagnética.

Para su funcionamiento se requiere de un equipo de zapatas que son instaladas en medio de las ruedas de un boguie, y sostenidas con resortes por encima de los rieles.

Al momento del frenado, los elevadores neumáticos aplastaran los resortes de la suspensión, el cual aplicara la zapata sobre el riel.

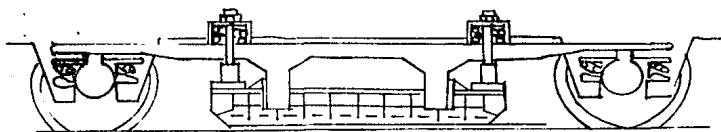
Simultaneamente, una bobina de corriente continua desarrolla un campo magnético intenso, para que se obtenga la atracción entre el riel y la zapata. Incrementando la fuerza de frenado del vehiculo.

Estas zapatas estan constituidas por unas articulaciones electromagnéticas, las cuales estan suspendidas a 8mm aproximadamente sobre el tope del riel, energizandose por medio de un contactor y creando un flujo electromagnético entre la zapata y el riel, resultando una fuerza de atracción entre la articulación y el riel.

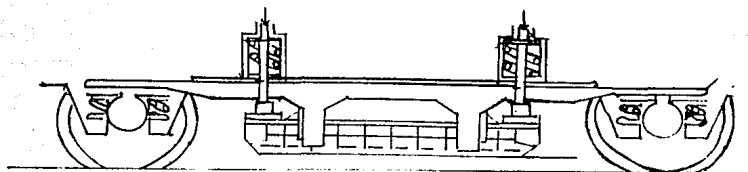
Se utilizan dos tipos de articulaciones o magnetos; una es de suspensión alta, usado especialmente por su tamaño en ferrocarriles.

El de suspensión baja es usado principalmente en trenes urbanos y tranvias. La diferencia es que el de suspensión baja actúa más rapidamente por estar colocado casi cerca del riel.

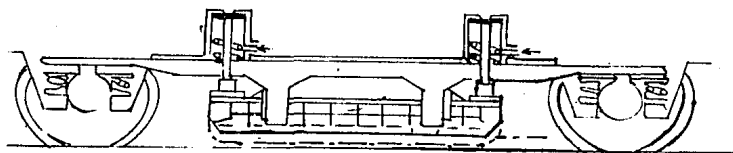
Estas piezas son rigidamente unidas al marco del boguie, con un material no magnético que sera colocado entre el magneto y el carro.



SUSPENSION BAJA



SUSPENSION ALTA



COMBINACION ALTA-BAJA

Fig. 19

FRENADO INDEPENDIENTE DE LA ADHERENCIA.

FRENO POR MEDIO DE INDUCCION.

Este freno utiliza un campo magnético, que crea un campo inductivo opuesto al desplazamiento.

Este campo es creado por una zapata multipolar y el riel en donde se desarrollan corrientes turbulentas donde se genera un esfuerzo en oposición al desplazamiento, figs. 21 y 22.

La zapata tiene una forma rectangular de aproximadamente dos metros de longitud, constituido por un bloque de acero suave compuesto y por circuitos magnéticos.

La estructura es fuertemente rígida para las resistencias a los esfuerzos verticales y horizontales.

La alimentación eléctrica de las bobinas de inducción se obtiene de dos formas:

- Utilizando la corriente del motor de tracción cuando se encuentra como generador.
- Una alimentación directa de las baterías .

La potencia absorbida por cada magneto es poco superior a los 50 kW.

Entre tanto el problema que se debe tratar de evitar son los calentamientos entre las zapatas y el riel (180 °C en 100 seg) y un frenado repetitivo en el mismo lugar ya que es muy riesgo por el fuerte deterioro de los rieles.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

- VENTAJA.

No hay desgaste de las piezas en contacto y un esfuerzo retardador superior al de las zapatas electromagnéticas.

- DESVENTAJA.

Un calentamiento elevado de la via, un consumo eléctrico elevado.

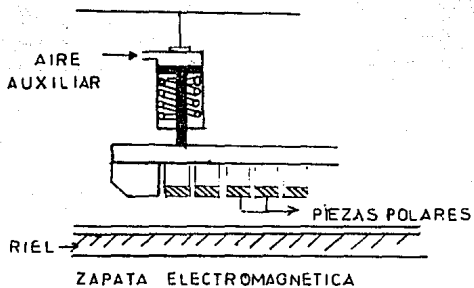
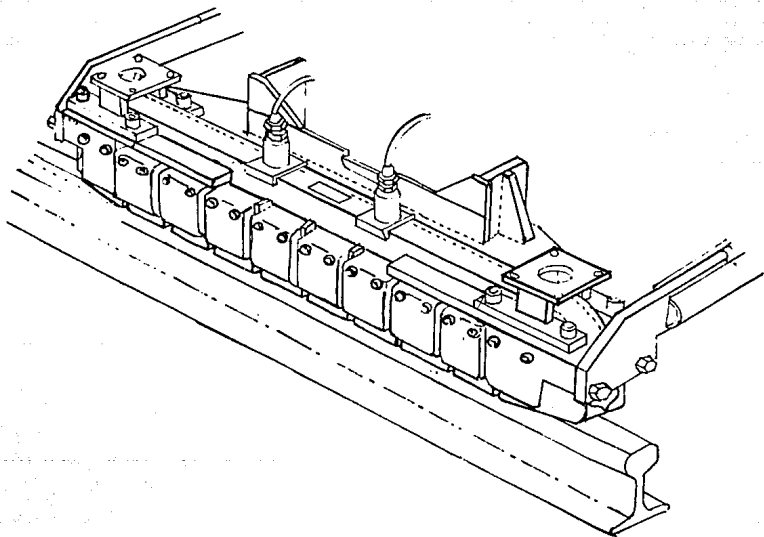
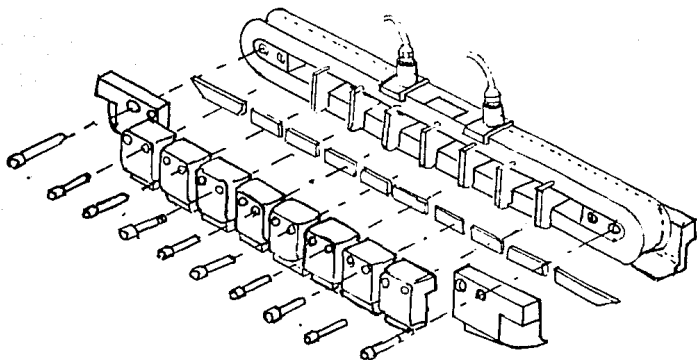
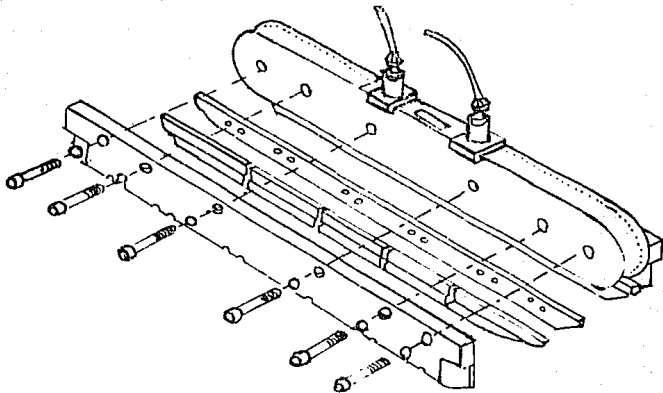


Fig. 20



MAGNETO ARTICULADO

Fig. 21



MAGNETO RIGIDO

Fig. 22

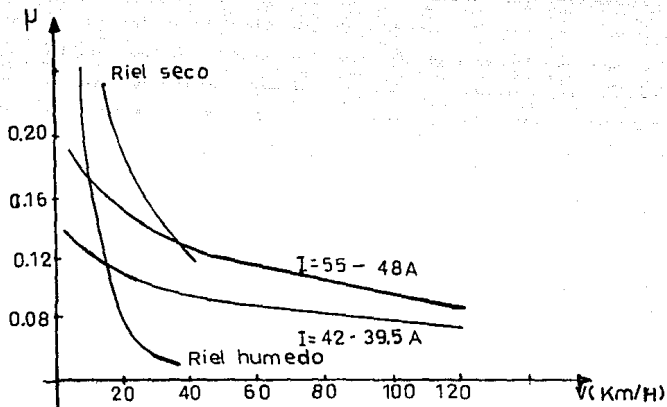


Fig. 23

Variación del coeficiente de adherencia en función de la velocidad y la corriente de inducción dentro de las bobinas de las zapatas.

FRENADO ELECTRICO.

INTRODUCCION.

El freno eléctrico de los vehículos es importante por que representa una economía desde el punto de vista mantenimiento y de ahorro de energía: ya que disminuye los costos asociados al mantenimiento del freno mecánico; como son el reemplazo frecuente de balatas de freno y tambores o discos de freno. Por otra parte el frenado eléctrico por recuperación representa un ahorro de energía eléctrica para el sistema en general.

Durante el frenado eléctrico se utiliza la propiedad de reversibilidad de funcionamiento, que ofrece la máquina eléctrica de corriente directa.

- Funcionando como motor (tracción).
- Funcionando como generador (frenado).

Para el caso de un frenado eléctrico donde los motores de tracción funcionan como generadores, la energía eléctrica producida puede utilizarse de dos formas:

- Disipandola en forma calorífica en resistencias dispuestas expresamente para ello, Siendo este el frenado reostático.
- Regresandola a la línea. Este frenado es llamado por recuperación o regenerativo.

- FRENADO REOSTATICO.

En este modo de frenado donde los motores de tracción funcionan como generatrices, se tienen dos modalidades:

- Generadores con autoexcitación; serie o derivada.
- Generadores con excitación separada.

Frenado con Autoexcitación.

Consideremos un motor conectado a la línea y funcionando en tracción. Este desarrolla una fuerza contraelectromotriz y su polaridad es la indicada en la fig. 24.

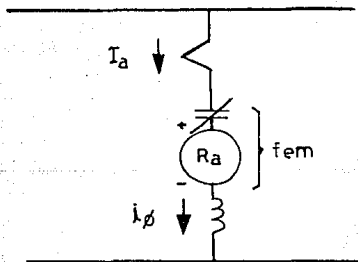


Fig. 24.

Suponiendo que se corta la alimentación del motor. El flujo remanente que subsiste en los polos principales mantiene una fuerza electromotriz de un valor pequeño y de la misma polaridad que durante la fase de tracción, ya que, como el vehículo lleva una velocidad y la máquina está directamente acoplada a las ruedas, ésta continua moviéndose en la misma dirección. Para que inicie la generación y circule una corriente I , es necesario insertar en el circuito del motor una resistencia "R". Ver fig.25.

I = Corriente.

ϕ_0 = Flujo remanente.

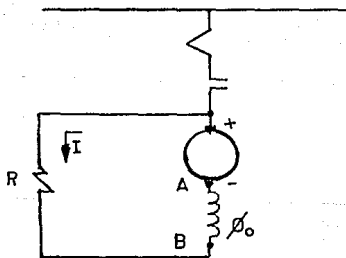


Fig. 25.

Si se procede de ésta manera, se observa que la corriente I generada por la máquina tiende a desexcitar los polos principales ya que la corriente circula en sentido opuesto al que tenía durante la tracción y crea un flujo ϕ_I dado por la ecuación:

$$\phi_I = \frac{NI}{R}$$

El flujo resultante estará determinado por:

$$\phi = \phi_0 - \frac{NI}{R}$$

Se ve que llegará el momento en que sea igual a cero y por tanto, en el punto B de la fig.26 tendremos:

$$V_g - K\phi_t = 0$$

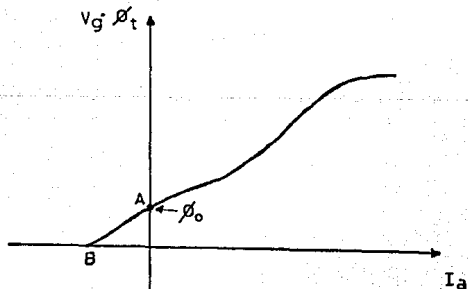


fig.26.

La suma algebraica de los flujos $\phi + \phi_1$ se hacen cero dado que la corriente es en sentido opuesto a la que circula en tracción.

Por lo que no es posible proceder así de fácil para obtener un frenado reostático.

Es necesario para evitar el resultado anterior, el cruzamiento de puntos de conexión del inductor. Como lo muestra la fig. 27.

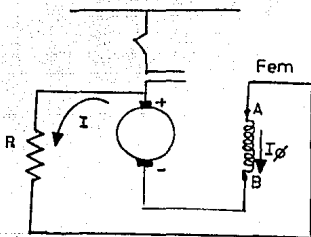


fig. 27.

En este caso la corriente generada por el motor crea un flujo el cual refuerza al flujo remanente, por lo que se incrementa el V_g , consecuentemente por ley de ohm aumenta "I" y así sucesivamente hasta que se igualan los voltajes siguiendo el proceso que se describe a continuación:

Considerando la fig. 28 donde se presenta la curva $V_g(I)$ del motor, se observa un voltaje generado V_g debido al flujo remanente, al cerrarse el circuito a través de la resistencia R , circula una corriente I , dicha corriente incrementa el flujo y a su vez el voltaje generado, siendo ahora el nuevo voltaje V_g , éste voltaje hace circular la corriente I y ésta a su vez hace que se genere V_g y así sucesivamente hasta llegar al punto de estabilización donde se cruzan las curvas $V_g(I)$ y $(R+r)I$.

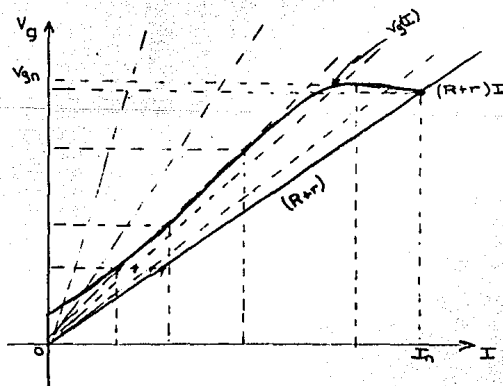


Fig. 28
Curva $V_g(I)$.

$$V_g(I) = (R+r)I$$

donde R es el valor de la resistencia del circuito exterior y r es el valor de la resistencia interna del motor.

Se observa sobre la gráfica anterior que el inicio del funcionamiento del generador no es posible más que para un valor inferior al valor límite de $R+r$, límite que se denomina bajo el término de resistencia crítica.

En el caso de un motor saturado el punto de intersección está bien determinado.

En el caso de un motor no saturado la determinación del punto de funcionamiento, alrededor del codo, es muy impreciso.

Esta falta de moderabilidad es un inconveniente importante del frenado reostático con autoexcitación.

FRENADO CON MAQUINA DE EXCITACION SEPARADA.

Considerando la fig. 29. Donde se tiene un motor funcionando como generador con excitación independiente. El cuál se rige por las siguientes ecuaciones:

$$V_g = k\phi\omega \quad \dots\dots\dots 1$$

$$\text{Par de Frenado} = k\phi I_a \quad \dots\dots\dots 2$$

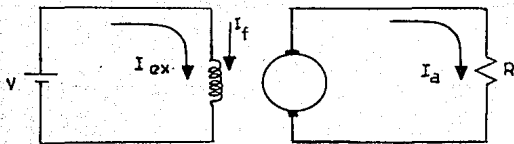


fig. 29.

De la ecuación 1 se aprecia que el voltaje generado V_g es proporcional a la velocidad de la máquina, así como al flujo, por lo que conociendo su curva de saturación podemos determinar y fijar un valor de V_g como límite permisible a fin de que ésta no se dañe a si misma. Ya que si la velocidad (ω) es muy alta se genera un voltaje alto, lo cual ocasiona arcos eléctricos entre las delgas del colector en el motor, el voltaje entre delgas debe ser menor de 20 volts.

Por otro lado en la ecuación 2 se observa que el par ó esfuerzo del frenado se puede controlar ya sea variando la excitación o la corriente que fluye por la armadura.

Por tanto durante un frenado reostático las acciones de la I_a y la I_{ex} son las siguientes:

La intensidad de corriente que circula por las armaduras o inducidos se trata de mantener a un valor promedio constante, a través de una reducción progresiva de resistencias para determinar una deceleración media constante, esto se puede apreciar en la siguiente ecuación.

$$I_a = \frac{V_g}{R} = \frac{k\phi\omega}{R}$$

Lo anterior suponiendo que se alimenta el campo con una fuente constante, entonces el flujo ϕ será constante y tendremos que:

$$I_a = \frac{k\omega}{R}$$

Siendo que si la velocidad disminuye se deberá reducir el valor de la resistencia para conservar el mismo valor de la I_a a modo de asegurar un par constante.

Graficamente este control tiene la siguiente forma:

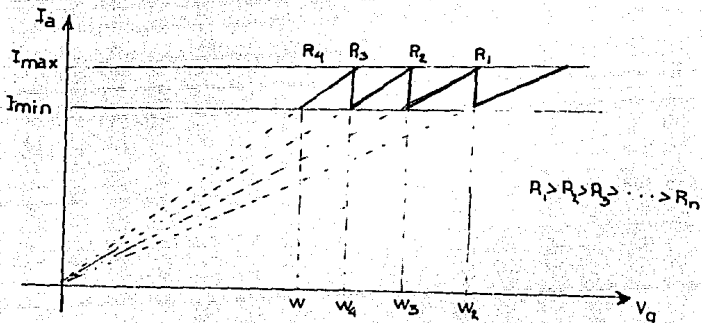


fig. 30.

Para el caso de altas velocidades donde el voltaje generado podría ser perjudicial para las delgas del colector ($0 < V < = 20$ v) se regula la intensidad de corriente que circula por los campos intercalandole resistencias en paralelo a éste, (control a campo reducido).

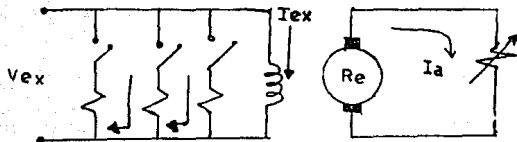


fig. 31

Al bajar la velocidad se van retirando las derivaciones del campo con lo cual incrementa el flujo y se mantiene V_g a un cierto valor permisible.

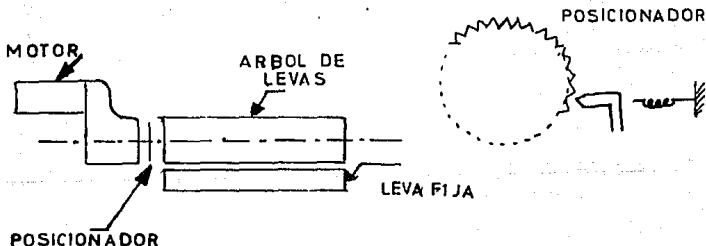
Regularmente se combinan estas dos formas de regulación del frenado para una máquina con excitación separada.

La intensidad de la corriente que circula por los campos (inductor), permanece a un determinado valor constante para un grado de frenado solicitado gracias a un equipo de regulación el cual puede ser electromagnético o electrónico.

EQUIPO CONTROLADOR DEL FRENADO REOSTATICO.

Los acoplamientos de resistencias se obtienen a través de varios contactores actuados por un mecanismo conocido como "árbol de levas", el cual ha estado en uso desde principios de los años 50,s.

En la fig. 32. se muestra el sistema de un árbol de levas simplificado. Accionado por un motor eléctrico a través de una caja de engranes. La rueda estriada ó posicionador es movido con precisión y rapidez, posicionando el árbol de levas (contactos móviles) en cada paso.



Sistema del árbol de levas simplificado.

fig. 32.

La suavidad de control, el tiempo de respuesta y la capacidad de retrogresión, son algunas de las características importantes del controlador reostático.

Un controlador de levas es esencialmente un control de pasos y por tanto la suavidad de control está directamente relacionado con el número de pasos ó muescas en el controlador, pero un gran número de muescas da como resultado un árbol de levas largo.

El tiempo de respuesta de un controlador está relacionado a la velocidad con la cual el circuito pueda realizar los cambios requeridos. Este tiempo de respuesta puede ser también reducido si se agregan más contactos en el controlador ó teniendo un segundo motor accionador. Un árbol de levas puede controlar los contactos para los cambios del circuito.

Alternativamente un controlador puede controlar la tracción y el otro puede controlar la operación de frenado. En tal caso mientras el controlador está en tracción, el controlador de frenado puede estar continuamente "detenido" y por así decirlo, estar listo para cuando el circuito requiera de su conexión dependiendo de la velocidad del vehículo.

Otra importante característica de un controlador es la posibilidad de retrogresión a pleno campo ó campo reducido.

Los primeros controladores lograron el control de la energía solo para la progresión del vehículo.

Con una retrogresión completa es posible regresar un motor a conexión serie de una conexión en paralelo y así también como el control de las derivaciones del campo. Como tal, el controlador debe estar provisto en todos sus contactores principales de extinguidores de arco eléctrico y bobinas de soplado.

El mecanismo completo del sistema reostático incluye bastantes componentes de los cuales solo se muestran algunos en las figuras posteriores.

Para tener una idea gral. de éste tipo de controlador, en las siguientes figuras 33, 34 y 35 se muestra un controlador con todo y sus accesorios.

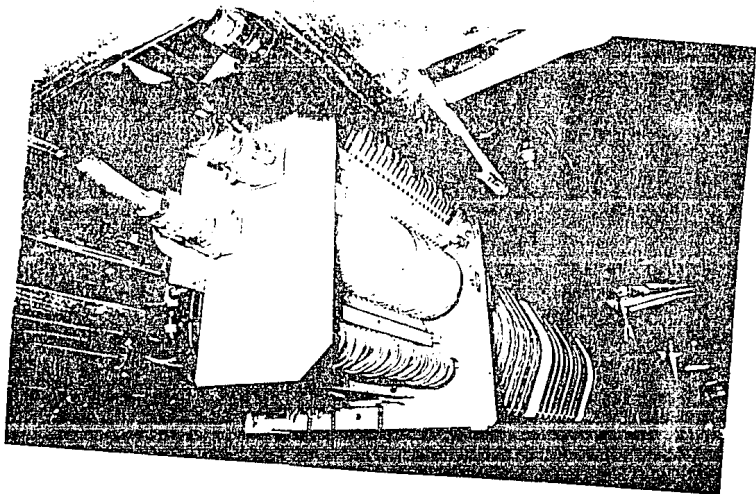


Fig. 33
Controlador árbol de levas.

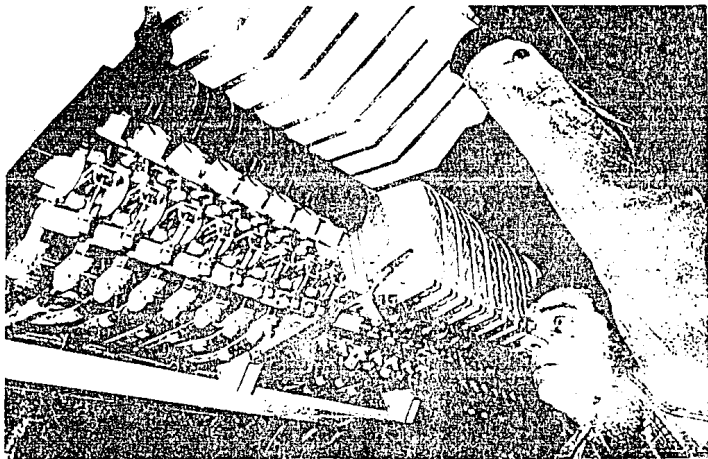


Fig. 34

Dibujo de un controlador eléctrico.

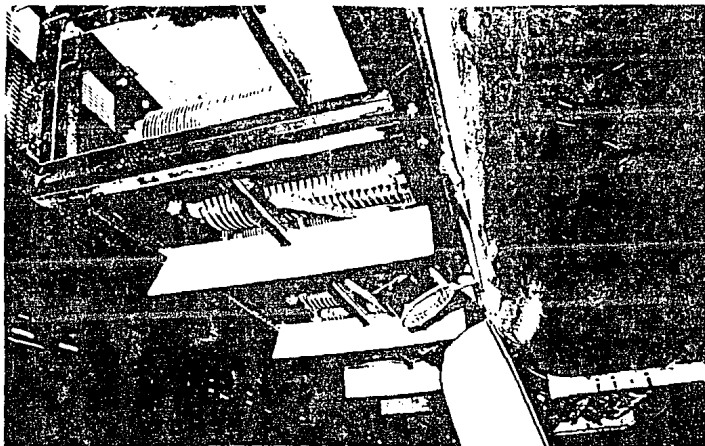


FIG 35
Ensamble de resistencias típicas
en el frenado dinámico.

Las siguientes figuras nos muestran la evolución de un controlador reostático, hasta llegar al árbol de levas.

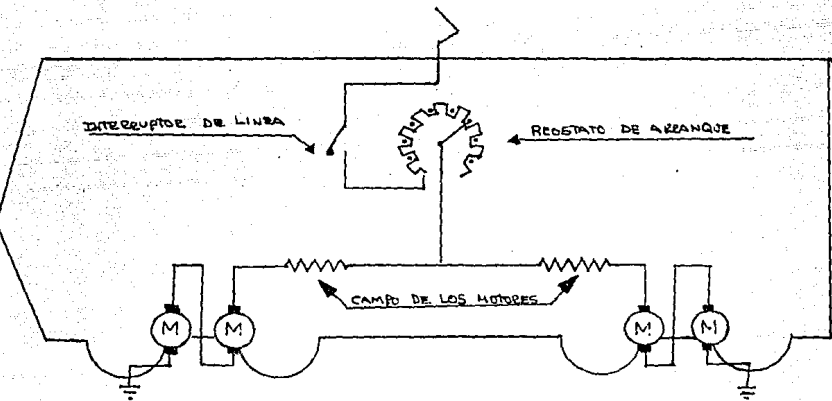


Fig. 36
Control por reostato de arranque.

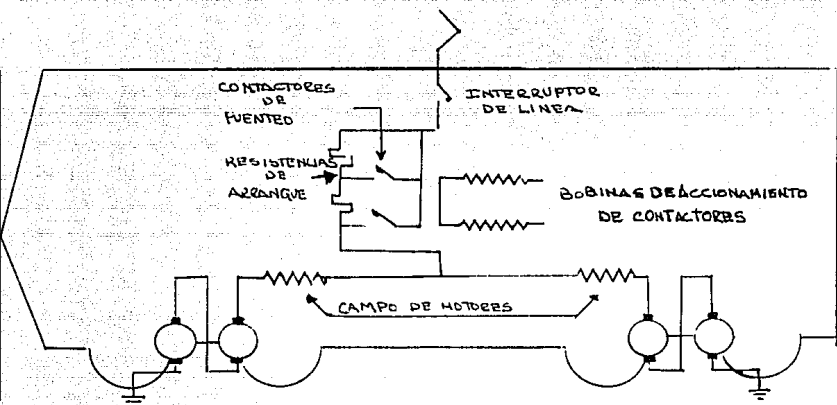
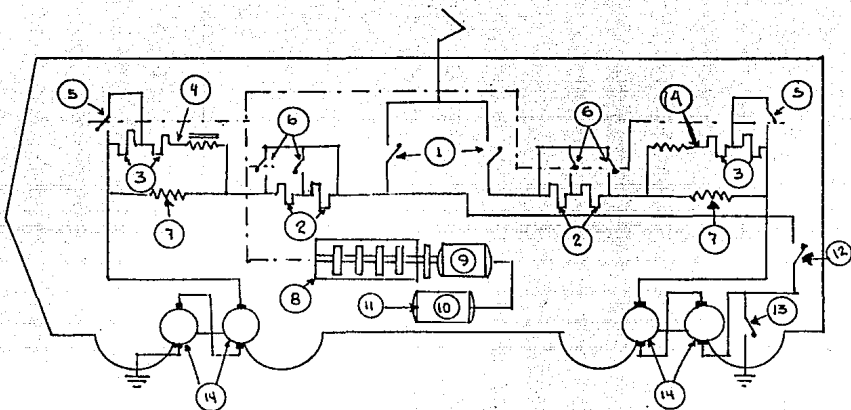


Fig. 37

Puenteo de resistencias de arranque por contactores.



- | | |
|--|---|
| ① -Int. Automatico | ⑧ -Arbol de levas (control de -
cierre de contactores de puenteo |
| ② -Resistencias de arranque | ⑨ -Servomotor de control del
árbol de levas |
| ③ -Resistencias de puenteo
de campo | ⑩ -Circuito de control del S.motor |
| ④ -Puente Inductivo | ⑪ -Manipulador |
| ⑤ -Contactores de puenteo
de campo | ⑫ -Int. de conexión en serie |
| ⑥ - Contactores de puenteo
de resist. de arranque | ⑬ -Int. de conexión paralelo |
| ⑦ - Campo de Motores | ⑭ -Motores de tracción |

Fig. 38

Control de puenteo por árbol de levas.

EL FRENADO POR RECUPERACION O REGENERATIVO.

Este frenado consiste en regresar a la línea la energía que se genera durante el frenado. El motor de tracción se transforma en generador, haciendo notar que la línea de alimentación debiera comportarse como receptor para que sea posible la regeneración (para ésto por ejemplo, algún tren debiera encontrarse en tracción ó la subestación debiera contar con un inversor el cual pueda enviar la energía regenerada a la línea de alta tensión 30).

MODOS DE EXCITACION.

Al igual que en el frenado reostático es posible excitar los campos de dos formas:

- a) Excitación serie.
- b) Excitación separada.

Examinando el caso de la excitación serie con ayuda de la fig. 39.

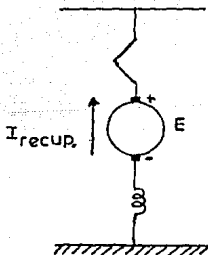


fig. 39.

Donde se muestra la polaridad del motor de tracción, la corriente recuperada hacia la línea está definida por la relación:

$$U = E - rI$$

entonces

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

donde r es la resistencia del circuito de la máquina.

Suponiendo que la tensión de la línea baja, la expresión anterior demuestra que la intensidad aumenta. Como el generador está con excitación serie, la fuerza electromotriz aumenta, por lo consiguiente aumenta la corriente de recuperación que a la vez ocasiona un aumento de la fuerza electromotriz y así sucesivamente.

El sistema de excitación serie es por consiguiente inestable y la corriente tiende rápidamente a un valor inadmisibles.

El sistema con EXITACION SEPARADA también puede ser utilizado para éste fin. La exitación será ajustada para que la fuerza electromotriz E del generador sea superior a la tensión de la línea, fig. 40.

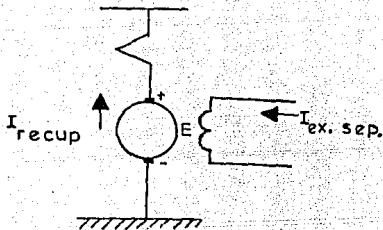


fig. 40.

CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO.

Haciendo referencia a la ecuación $I = \frac{E-U}{r}$

se tienen las siguientes observaciones:

- a) Si la fuerza electromotriz del generador baja al grado de igualarse a la tensión de línea, la corriente de frenado se anula.
- b) Por otra parte si la fuerza electromotriz se hace inferior a la tensión de la línea, la corriente cambia de sentido. Ahora la máquina absorbe corriente de la línea y funciona como motor. En efecto si la corriente se invierte el par cambia de sentido teniéndose en consecuencia un par motor.
- c) La fuerza electromotriz del generador debe ser superior a la tensión de la línea. Pero la intensidad de la excitación está limitada en una parte por el mismo equipo de excitación, por otro lado por el valor límite admisible

para los inducidos. Por lo que para garantizar una tensión suficiente se deben acoplar los motores de la siguiente forma:

- En serie para bajas velocidades.
- En serie paralelo para velocidades medias.
- En paralelo para velocidades elevadas.

PRINCIPIO DE OPERACION.

Durante un frenado eléctrico los motores (con excitación separada). Son conectados en paralelo para velocidades superiores a los 40 Km/h y en serie para menores ó iguales a esta.

El frenado eléctrico es ineficaz para velocidades bajas por ejemplo 12 Km/h en el caso del metro, el freno eléctrico es reemplazado por el freno mecánico.

La alimentación de los inductores puede ser controlada por un regulador electrónico (éste elemento electrónico es el medio que hace posible que un vehículo equipado con controlador reostático pueda ser utilizado para regenerar energía).

Para un grado de frenado comandado, la regulación electrónica ajusta en cada instante la excitación de los generadores a fin de mantener constante el par eléctrico y por tanto el esfuerzo de frenado.

Si el par eléctrico llegase a ser insuficiente, el freno mecánico interviene, controlado por el sistema de conjugación a fin de mantener el esfuerzo constante en toda la duración del frenado.

FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE REGULACION ELECTRONICA DEL FRENADO EN LOS TRENES DEL METRO, MODELO NM73B.

Un block electrónico de regulación del frenado cumple con las siguientes funciones:

- a) Ajustar a cada instante la excitación de los generadores a fin de mantener el par eléctrico constante, igual a la referencia fijada por el grado de frenado solicitado por el conductor.
- b) realizar la conjugación del frenado eléctrico con el frenado neumático.
- c) La de comandar el cambio de acoplamiento de los motores.

REGULACION DEL PAR ELECTRICO.

Esta regulación consiste en ajustar la excitación de los motores, para que el par $\left[\frac{U \cdot I}{V} \right]$ permanezca igual a la referencia fijada. Para hacer esto, la diferencia entre la corriente inductora de referencia y la corriente inductora medida (MI) actúa sobre el regulador de corriente de campo a fin de mantener el par eléctrico constante.

La cadena de regulación comprende dos bucles:

- Un bucle de medida del par de los generadores (MCE).
- Un bucle de medida de la corriente de excitación de los generadores (MI).

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

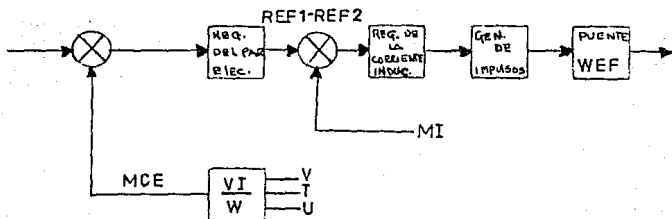


DIAGRAMA DE FLUJO PARA
REGULAR EL FRENADO

Fig. 41

CONJUGACION DE LOS FRENOS.

Para un grado de frenado superior a F3 (metro cd. de México) o en caso de defecto del frenado eléctrico existiera un par (MCE) insuficiente, entonces la conjugación de los frenos interviene para dar una referencia de presión, igual a la diferencia entre el par eléctrico y el par impuesto ó solicitado.

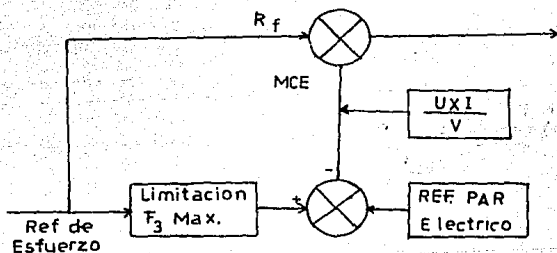


fig.42.

REGULACION DEL FRENO NEUMATICO.

Consiste en dosificar la presión en los cilindros de freno. Para hacer esto, la diferencia entre la presión de referencia y la presión medida actúa sobre el regulador de presión a fin de mantener la presión al valor pre-establecido.

Esta cadena comprende dos bucles:

- Un bucle de medida de presión (MP).
- Un bucle de la medida de corriente de la electroválvula que controla la presión de los cilindros.

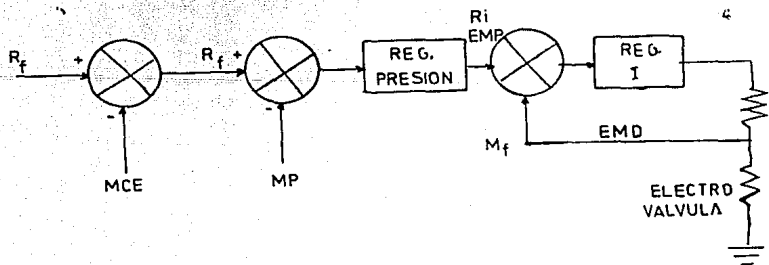


fig. 43.

CAMBIO DE ACOPLAMIENTO.

El cambio de acoplamiento se ordena en los casos siguientes:

- a) Durante un frenado: cuando la velocidad baja a un valor tal que no asegura un frenado correcto con los generadores acoplados en paralelo, aún cuando la corriente de los inductores a llegado a su valor máximo prefijado.

- b) Al inicio del frenado, si éste es solicitado a una velocidad menor o igual a la velocidad de aproximadamente 40 Km/h.

REGULACION DEL FRENADO POR RECUPERACION.

CIRCUITO DE POTENCIA.

El análisis de la regulación se hace con referencia al diagrama de la fig. 41, en el cual se tienen a los motores con excitación independiente.

A alta velocidad los motores entonces utilizados como generadores, tienen una fuerza electromotriz elevada. Sus armaduras o inducidos seran acoplados en paralelo siendo su fuerza electromotriz en ese momento muy superior a la tensión de la línea.

Los diodos D1 y D2 evitan el paso de la corriente de la línea hacia los generadores, lo que provocaria reconvertirlos nuevamente en motores de tracción, en caso de no existir cuando el voltaje generado sea inferior a la tensión de línea.

Al bajar la velocidad alrededor de los 40Km/h los diodos se bloquean debido a que el potencial de su anodo cae a un valor inferior al de su catodo, cambiando el sentido de la corriente hacia el contactor cx1.

En este momento se comanda la anulación de la excitación y al mismo tiempo el cierre del contactor cx1 y la apertura del contactor cx2.

Una vez acoplados en serie los motores, un bloque electrónico regula el grado de excitación, al comandar nuevamente el aumento de la corriente de excitación hacia los generadores para mantener el esfuerzo solicitado constante hasta que la velocidad baja a unos 12 Km/h aproximadamente.

Para velocidades inferiores a ésta, el esfuerzo de frenado se asegura totalmente de forma neumática.

Una resistencia R estará permanentemente insertada en el circuito para limitar la corriente en caso de variaciones bruscas de tensión en la línea.

El tiristor T interviene cuando no se puede recuperar más, su papel ,es el de limitar lo más rápidamente posible la sobre tensión instantanea de la línea . Para esto los generadores descargan sobre el tiristor y las resistencias de descrestamiento RD.

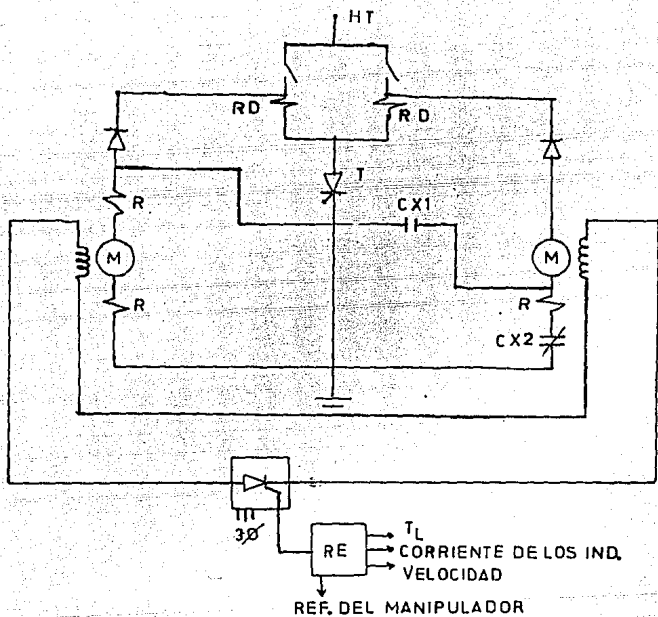


Fig. 44

SISTEMA DE CONTROL CHOPPER.

Existe otra forma de poder controlar tanto el arranque como el frenado eléctrico de los trenes siendo este; "El sistema por chopper o recortador", el cual comparado con el sistema convencional aún empleado hasta la fecha, elimina lo relativo al control de pasos con resistencias, el control se lleva a cabo con elementos semiconductores por lo que se reduce el consumo de energía eléctrica durante el arranque, además ofrece la capacidad de recuperar la energía durante el frenado, como esta energía no es disipada en resistencias evita el incremento de temperatura dentro del tunel.

Otro punto de vista es que este sistema reduce considerablemente los tiempos y los costos de mantenimiento, al mismo tiempo, proporciona confort debido a la inexistencia de pasos en el controlador (discontinuidad en el par motor).

Haciendo un poco de historia, se desconoce exactamente desde cuando aparece el sistema de control por chopper. Se sabe que los semiconductores aparecen en 1948 notándose un avance tremendo hasta llegar al diodo de silicio de potencia entre 1956 y 1958; pero fué hasta 1963 que apareció el elemento llamado tiristor.

Los intentos de utilizar estos elementos semiconductores para el control de los circuitos principales de los vehículos de transporte eléctrico ferroviario, se llevaron simultáneamente con su desarrollo.

En 1963 en Japón se realizan pruebas básicas del control chopper. En 1965 se hicieron las primeras pruebas en los carros de servicio del metro de Tokyo. Finalmente en 1970 circuló por primera vez en Japón el modelo 7000 de la línea OSAKAKOBE como tren con control chopper aunque únicamente con el control de tracción.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL CHOPPER O RECORTADOR.

El chopper básicamente es un interruptor que se cierra y se abre en forma periódica. Como resultado de esta acción con una carga resistiva, idealmente tendrá a la entrada una tensión constante y una corriente en forma de pulsos rectangulares y a la salida, una tensión pulsante como se observa en la fig. 45.

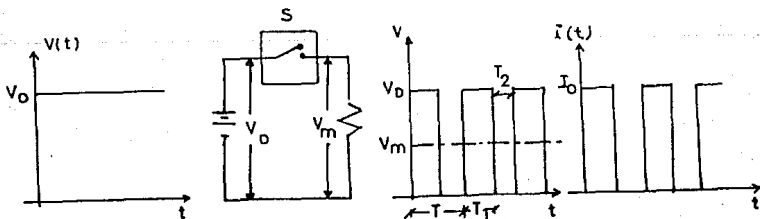


Fig. 45.

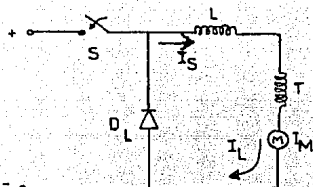
La tensión pulsante de la salida varía entre la tensión de la fuente de energía V_0 y cero y su valor medio V_m será:

$$V_m = \frac{T_1}{T_1+T_2} V_0 \quad V_m = \frac{T_1}{T} V_0 = \alpha V_0.$$

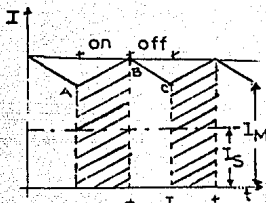
Eso significa que V_m varía con la proporción del tiempo cerrado del interruptor. Regulando apropiadamente la relación α , se puede lograr el control de la tensión.

La aplicación de este principio al control de un coche eléctrico, es como sigue:

Si un motor de tracción se controla por el circuito mostrado en la fig. 46, Al momento de estar el interruptor S cerrado, la corriente circula del borne positivo de la fuente, inductancia L, motor, borne negativo; en ésta fase la inductancia L, denominada de alisamiento, almacena energía en forma de campo magnético y el diodo D llamado de rueda libre, permanece polarizado en inversa y no es conductor. Cuando el interruptor S se abre, la inductancia L entrega energía al motor y la corriente circula por el diodo de rueda libre. Este proceso se repite mientras dure la tracción.



(a)



(b)

fig. 46.

Cuando el interruptor S se cierra, la corriente del motor de tracción (I_M) pasa de la fuente de energía y se incrementa, mientras se almacena la energía en el reactor L, como se muestra en la curva AB de la fig. 46b.

Cuando se abre el interruptor S, la corriente de la fuente se vuelve cero y la corriente (I) debida a la energía almacenada en el reactor fluye a través del circuito D y se va atenuando, mientras la corriente del motor de tracción declina con un cambio representado por la curva BC de la fig. 46b. Repitiendo esta operación de cierre apertura, el valor medio I_M de la corriente del motor se mantiene a cierto valor. Es evidente de esta explicación que la corriente I_S que viene de la fuente corresponde únicamente a la parte sombreada de la fig. 46b, y su valor medio I_S es siempre menor a I_M .

FUNCIONAMIENTO DURANTE EL FRENADO.

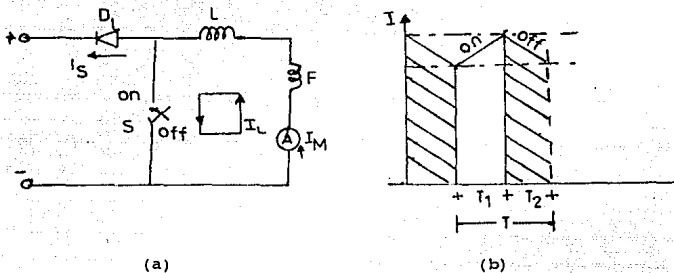


Fig. 47. Circuito para el Frenado.

En éste caso, cambian de posición tanto el interruptor, como el diodo D , cuando se comanda un frenado.

Si el interruptor S se cierra, una corriente debida a la tensión inicial generada por el flujo residual, va a fluir a través del reactor L debidamente conectado pasando por el interruptor S, realimentandose e incrementando la excitación remanente, así como la tensión generada hasta el instante que esta tensión se hace poco inferior a la tensión de línea, se abre el interruptor S y al ser la tensión generada sumada a la tensión de la inductancia $L \frac{di}{dt}$, mayor que la tensión de línea, permite que la corriente fluya hacia la fuente de energía (línea) a través del diodo D .

Esta es la regeneración de energía y la parte sombreada de la fig.47b. representa la energía regenerada. Como la energía almacenada en el reactor es regresada a la fuente de energía esta corriente tiende a disminuir, y la tensión generada a caer, por lo tanto el interruptor se vuelve a cerrar para aumentar nuevamente la corriente y repetir el ciclo.

Cuando tomamos a I_m como el valor medio de la corriente del motor, I_s será el valor medio de la corriente de la línea regresada a la fuente de energía, es decir:

$$I_s = \frac{T_2}{T_1+T_2} I_m \qquad I_s = (1-\alpha) I_m$$

Si despreciamos la resistencia interna del reactor, la tensión media del reactor durante la operación normal sera cero.

De esta forma, la tensión media V_m del motor iguala la tensión media V_o de la línea .

$$V_m = \frac{T_2}{T_1+T_2} V_o = (1-\alpha) V_o$$

En contraste con el funcionamiento del chopper en traccion , el chopper funciona durante el frenado regenerativo como un transformador para elevar la tensión.

Este sistema puede garantizar el frenado regenerativo hasta una velocidad muy baja, aproximadamente 6 Km/hr.

CHOPPER CON TIRISTORES.

Para el control de los motores de tracción de DC, la frecuencia de funcionamiento de los interruptores es alta (aproximadamente 500 Hz), por lo que en la práctica se utilizan dispositivos electrónicos, llamados tiristores. Para llevarlos al estado de conducción, es necesario aplicarles un pulso en su compuerta (gate) pero para bloquearlos es necesario un circuito adicional, llamado circuito de extinción.

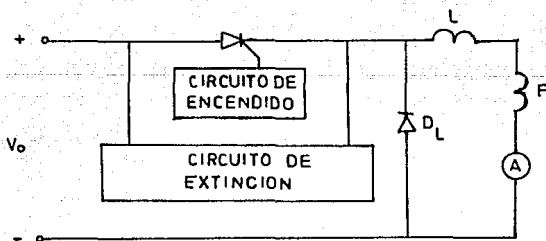


fig. 48.

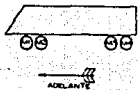
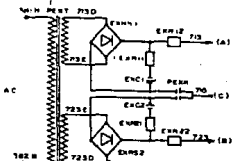
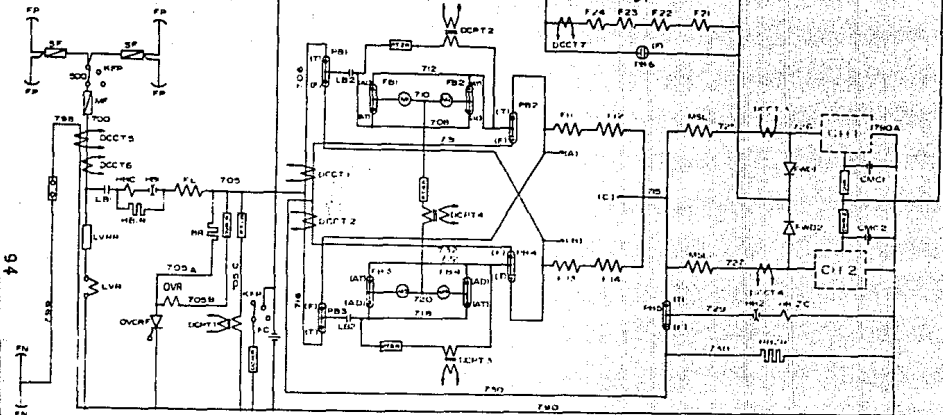
El control por medio de tiristores origina algunos problemas de interferencia y cambios en el funcionamiento del sistema. El chopper puede originar ondulaciones armónicas en la línea que afectarían a los sistemas de señalización y de comunicaciones, por otro lado las ondulaciones producidas en las subestaciones rectificadoras influyen en la conmutación de los tiristores.

Para eliminar ó atenuar al máximo ambos efectos, se conecta entre la fuente de alimentación y el chopper un filtro LC.

Las ondulaciones y armónicas producidas por la acción pulsante también afectan a los motores, principalmente en lo que se refiere a la conmutación. Para disminuir al máximo dicho problema se conectan bobinas o reactores de alisamiento de corriente a la salida del chopper.

Otra forma de disminuir las interferencias causadas por dichas armónicas, en el tren de pulsos a la salida, es el uso de choppers multifase combinados con el filtro LC entre la fuente de alimentación y el chopper. El uso del chopper multifase reduce el tamaño y peso del filtro ya que las ondulaciones de tensión y corriente dependen del número de fases y en última instancia de la frecuencia de trabajo.

La fig.49, nos muestra un circuito típico para un controlador chopper.



100 - Interruptor Térmico Frenado
 701 - 704 - 725 - 726 - 727 - 728 - 729 - 733
 701 - 704 - 725 - 726 - 727 - 728 - 729 - 733
 (A) - Anterior, (B) - Batería

**ESQUEMA DE LOS
 CIRCUITOS DE POTENCIA**

FIG. 49

NOMENCLATURA DEL LOS ELEMENTOS ILUSTRADOS EN LA FIG. 49

KFP - conmutador escobillas trole.

MF - fusible principal.

LB1,2 - interruptor de linea.

HB1 - interruptor de alta velocidad.

HB1R - resistencia reductora de corriente y carga de condensador FC.

FL - reactor de linea.

BR - resistencia de frenado.

OVCRF - tiristor de sobrevoltaje.

FC - condensador de filtro.

PB - conmutador tracción frenado.

FB - conmutador adelante atras.

F11,12,13,14 - bobinado serie de motores.

F21,22,23,24 - bobinado AVF de motores.

MSL - reactor principal de alizamiento.

FWD - diodo de rueda libre.

CH - chopper.

CMC - condensador de conmutación.

CHR - resistencia de carga del CMC.

HB2 - interruptor de alta velocidad y puenteo del chopper.

HBRR - resistencia reductora de corriente.

REGULACION.

CONTROL DE CAMPO VARIABLE AUTOMATICO (AVF).

Con el sistema AVF, es posible regular automaticamente no solo la corriente de armadura, sino también la corriente de campo, controlando la razón de conducción del chopper, sin un chopper de campo adicional.

El sistema AVF proporciona las siguientes ventajas:

- 1.- Rendimiento mayor durante el frenado regenerativo.
- 2.- Un control continuo sin contactores de puenteo de campo, reactores y resistencias, así como un circuito más simple, estabilidad en el frenado regenerativo y un mantenimiento reducido.
- 3.- Reducción del peso y espacio.

Principio y Características del Sistema AVF.

Como se muestra en los diagramas simplificados del circuito principal, el devanado de campo de un motor serie convencional es dividido en dos secciones, una es conectada en serie con la armadura como un motor ordinario, mientras que la otra es conectada en el circuito de interrupción de un chopper de dos fases.

Las bobinas de campo F1 y F2 están conectadas en serie con el diodo de rueda libre FW, el cual continuamente debilita a F2 mientras la velocidad se incrementa, es decir cuando se incrementa la razón de conducción.

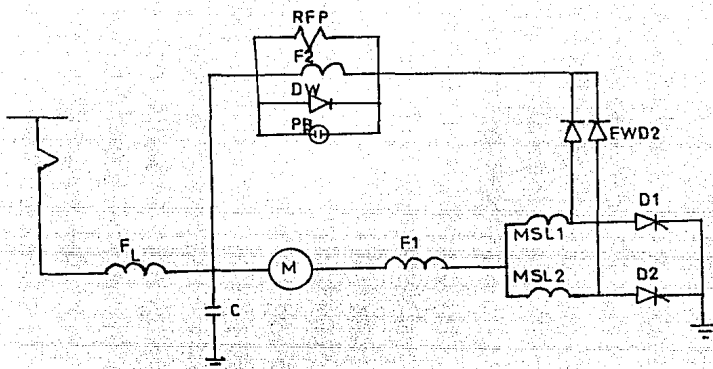


fig.50. Circuito de Potencia en tracción.

Al mismo tiempo, el campo F1 es mantenido constante por medio de un control de corriente constante, así que el control de campo débil es aplicado automáticamente en el caso de la operación de tracción y lograr alcanzar la condición de campo más débil cuando la razón de conducción alcanza su máximo valor.

En el circuito de frenado regenerativo fig.51. puesto que el campo F2 está conectado en serie con los choppers, la condición de campo débil dada por F1 es mantenida en el rango de alta velocidad donde la razón de conducción es pequeña.

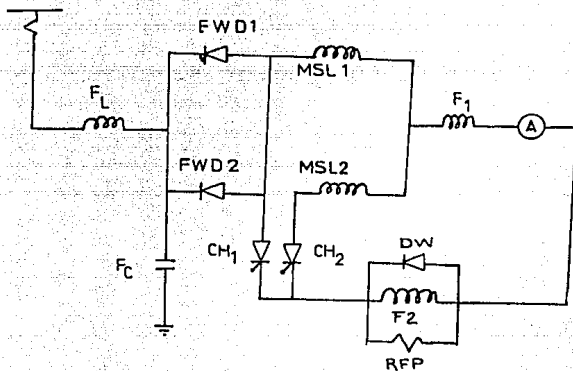


fig.51. Circuito de potencia en Frenado Regenerativo.

- FL.- Reactor de filtro.
- FC.- Condensador de filtro.
- F1.- Campo serie.
- F2.- Campo AVF.
- FW1,2.- Diodos de rueda libre.
- DW.- Diodo de campo.
- RFP.- Resistencia no inductiva.
- MSL1,2.- Reactor de alizamiento.

Con una disminución en la velocidad, la razón de conducción se incrementa y el flujo magnético de F2 también es incrementado, causando una intensificación en el control de campo. De esta manera, el valor límite de corriente es disminuido en relación de la disminución de la velocidad y así realizar un control de la fuerza de frenado constante.

Así la capacidad del frenado regenerativo es incrementada sin aumentar la capacidad de corriente necesaria del circuito, como era requerido en el sistema convencional.

La intensidad de campo magnético viene dado por la siguiente expresión:

$$\phi = \%F = \frac{N_a I_a + N_{avf} \times I_{avf}}{I_a (N_a + N_{avf})} \times 100$$

Donde:

N_a .- Número de vueltas del devanado de armadura.

N_{avf} .- Número de vueltas del devanado de AVF.

I_a .- Corriente de armadura.

I_{avf} .- Corriente de AVF.

Recordando la expresión de la velocidad en relación con la intensidad de campo magnético, para un motor de campo serie.

$$W = K \frac{V - I_a (R_a + R_s)}{\phi}$$

Combinando la acción del chopper en ambas ecuaciones para tracción, resulta.

Si CH conduce implica ϕ disminuye y W aumenta.

Si CH no conduce implica ϕ aumenta y W disminuye.

De la misma forma se puede proceder para las condiciones de frenado.

La combinación de las acciones del chopper y AVF, aparte de darnos un control de la tensión y corriente aplicada al motor, nos permite regular con mayor precisión la velocidad, par y otras características del mismo.

De todo lo anterior, se concluye que el circuito de potencia principal para el frenado regenerativo se le conoce como campo variable automático (AVF), y que el campo efectivo del motor continuamente crece a medida que la velocidad se incrementa.

CONJUGACION DE FUNCIONAMIENTO ENTRE LOS SISTEMAS DE FRENADO ELECTRICO Y MECANICO.

Los coches motores desarrollan la mayor parte del esfuerzo de frenado. Hasta un esfuerzo correspondiente a $3/4$ del frenado total para un tren cuya formación tipo es M+R+M en frenado eléctrico, la deceleración es posible por frenado eléctrico hasta 0.9 m/s. Por encima de este valor, el suplemento del esfuerzo necesario queda a cargo del frenado neumático. Cada vehículo desarrolla el mismo esfuerzo de retención neumática.

En caso de que uno de los coches motores fuese inapto al frenado eléctrico, o bien, en caso de imposibilidad de recuperar, dicho coche motor y el remolque frena en régimen neumático tomando cada caja su propio esfuerzo mientras que el otro coche motor continua frenando en régimen eléctrico.

No obstante, en el caso de la opción con frenado reostático este último sustituye entonces, y en las mismas condiciones que anteriormente, el frenado por recuperación. En el momento en que se solicita el frenado, el frenado neumático se aplica en prioridad y únicamente a medida que va apareciendo el frenado eléctrico, el esfuerzo correspondiente queda deducido del frenado neumático. Si la totalidad del frenado no puede ser efectuada electricamente, queda así un esfuerzo retardador neumático que permite obtener la deceleración requerida.

Se obtienen entonces las curvas siguientes:

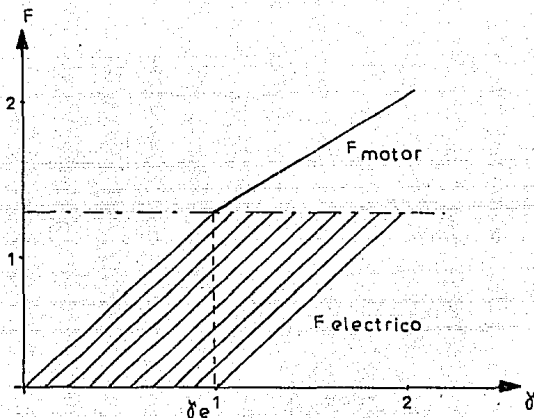


fig. 55.

Caso en que el frenado
eléctrico es efectivo.

a) $\delta_d \leq \delta_e$

$$F_M = \frac{2m'_n + m'_r}{2} \delta_d$$

$$F_R = 0$$

b) $\delta_d > \delta_e$

$$F_M = F_3 + m'_n(\delta_d - \delta_x)$$

$$F_R = m'_r(\delta_d - \delta_x)$$

δ = deceleración
requerida para
una formación tipo

M+R+M

m' = masa dinámica de un
coche motor M

m'_r = masa dinámica de un
remolque R

δ_d = deceleración con frenado
dinámico.

δ_e = deceleración con frenado
eléctrico.

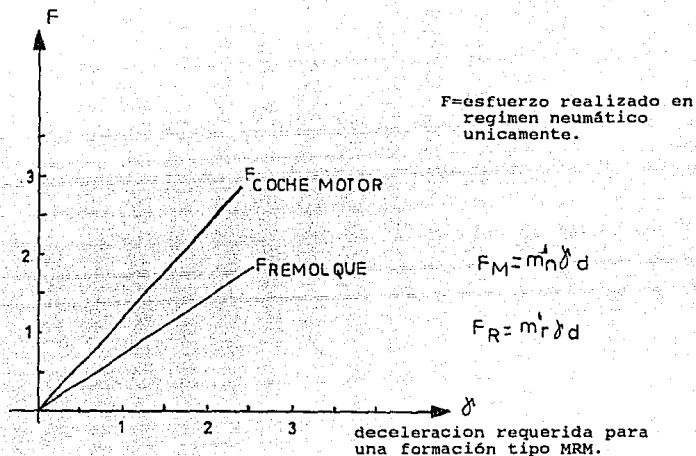


fig. 56. Caso en que el frenado eléctrico no es efectivo en ningún coche motor.

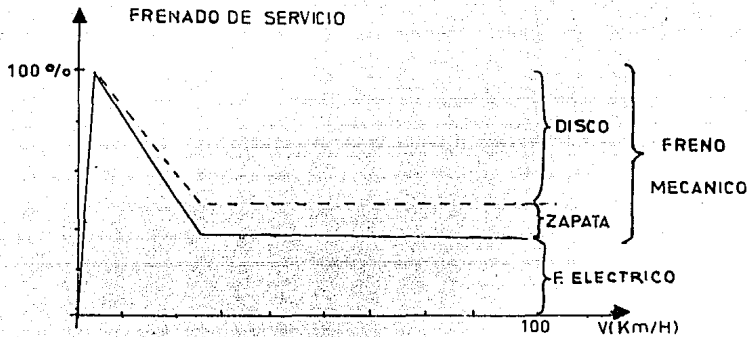
En la tabla siguiente se muestra el esfuerzo retardatriz expresado en porcentajes suministrado por cada sistema, siguiendo el tipo de frenado deseado. Con esta tabla nos podemos dar cuenta de cuanto esta aportando cada sistema de frenado para detener el vehículo, dependiendo del tipo de freno aplicado.

ESFUERZO EXPRESADO EN % PARA
DIFERENTES SISTEMAS DE FRENADO.

	Frenado Mecánico.		Frenado	Frenado Electro-
	Zapata	Disco	Eléctrico	magnético.
Frenado de Servicio	De 0 a 6%	De 0 a 6%	De 33 a 100%	0
Frenado de Estacionamiento.	100%	100%	0	0
Frenado de Seguridad.	6%	54%	0	40%

En la fig. 57. se muestran los diagramas de repartición de esfuerzo retardatriz en función de la velocidad y de los sistemas utilizados.

REPARTICION DE ESFUERZOS



FRENADO DE URGENCIA

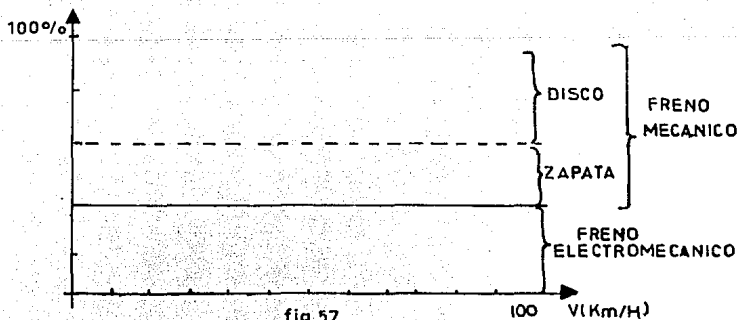


fig 57

EVALUACION DE LOS SISTEMAS DE FRENADO.

Mecánico	{ tambor disco
Electromagnético	{ fricción independiente de la adherencia
Eléctrico	{ reostático regenerativo

En lo que respecta al freno mecánico. El freno de disco ofrece numerosas ventajas en comparación con el freno de tambor:

- deceleración constante, también en caso de velocidades elevadas.
- tiempos de reacción más cortos y distancia de frenado más corta.
- larga duración del disco de fricción y de la guarnición de la mordaza de freno (varias veces más que con zapatas).
- Mayor duración de la rueda, ya que la superficie de rodadura solo es sometida al rodaje.
- mando neumático sencillo, por consiguiente ahorro de espacio y peso.
- consumo de aire reducido.
- mas confort por frenado suave y con poco ruido.

Debido a estas ventajas, el freno de disco se emplea cada vez más, sobre todo en caso de vehículos rápidos con grandes cargas por eje.

En cuanto al freno de tambor, éste es dependiente de la adherencia existente entre rueda y zapata, ya que presenta deficiencias al cambiar las condiciones de humedad de la pista de rodamiento. Con el riel seco es un frenado de bajo confort para los pasajeros.

El freno electromagnético es dependiente de la adherencia, presenta la ventaja de que tiene un desgaste reducido de las piezas en contacto y un esfuerzo retardado superior al de las zapatas de tipo mecánico.

Una desventaja es el consumo eléctrico excesivo (debido a la excitación de las bobinas del magneto).

VENTAJAS DEL FRENO ELECTRICO RESPECTO AL MECANICO.

- 1.- Este tipo de frenado no contamina por no desprenderse residuos en su aplicacion, mientras que el uso del freno mecánico produce ruido y residuos contaminantes.
- 2.- Liberación de las ruedas de tensiones térmicas y desgastes que provoca el frenado por rozamiento. Esto es particularmente importante a grandes velocidades, porque la buena conservación del perfil de las ruedas es un factor favorable en el mantenimiento y confort de marcha.
- 3.- Este tipo de frenado es ideal como regulador de velocidad en las pendientes, los esfuerzos necesarios en este caso, son compatibles con el valor del coeficiente de adherencia.
- 4.- Es económico al no utilizar zapatas de frenado, mientras que el freno mecánico requiere de un cambio de zapatas y accesorios.
- 5.- Cuando es freno eléctrico regenerativo se logra un ahorro de energía.

SISTEMA DE FRENADO ELECTRICO.

a) .-FRENADO REOSTATICO.

1.- El tipico frenado reostático es ineficiente, ya que gran parte de la energía requerida para acelerar el vehiculo se pierde; una cierta cantidad es disipada por las resistencias de arranque y el resto es almacenada como energía cinética en el vehiculo, para ser transformada en energía eléctrica y ser disipada por las resistencias de frenado en la fase de frenado.

2.- La energía requerida para mantener la velocidad de un vehiculo, es muy pequeña comparada con la energía total consumida. Y esto es porque además del motor de tracción, también el equipo auxiliar a bordo, las subestaciones y la línea, presentan pérdidas eléctricas. La disipación actual de energía en los componentes antes mencionados son altamente dependientes del tipo de servicio, y por tanto es difícil citar una distribución típica.

Para darse una mayor idea de la distribución de las pérdidas de energía se presenta la fig. 52.

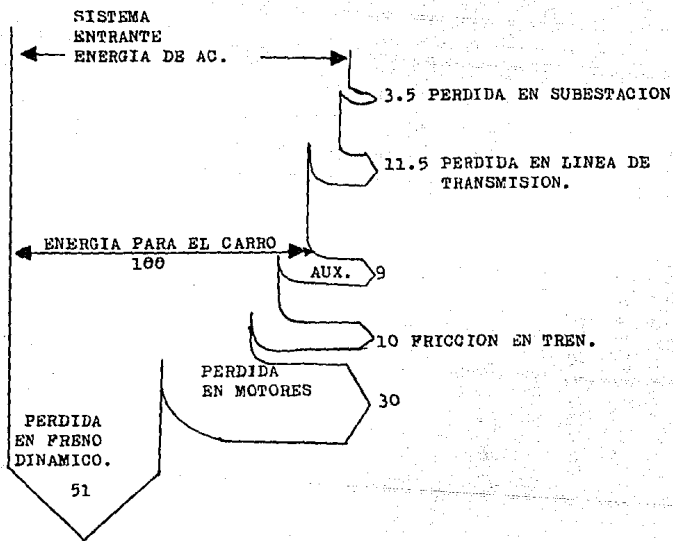


Fig. 52

Flujo de energia en el control reostático.

b).- FRENADO REGENERATIVO.

Por lo que la función básica de cualquier control de propulsión es el de regular el arranque y el frenado desarrollado por los motores de tracción, se observan varias ventajas y desventajas usando un controlador chopper sobre uno reostático.

VENTAJAS.

- 1.- Por ser un equipo de estado sólido, reduce su mantenimiento alrededor de un 50% en relación al que se da a un sistema electromecánico.
- 2.- En todo momento, el equipo chopper realiza una conjugación electrónica entre el frenado eléctrico y el neumático con el objeto de asegurar el grado de frenado pedido.
- 3.- Una adecuada regulación y un fino escalonamiento de voltaje da una calidad de marcha excelente debido a que acelera y frena sin escalones o discontinuidades, haciendo mas comodo el viaje para los pasajeros.
- 4.- Tiene la habilidad de controlar la regeneración de energía eléctrica a partir de la energía cinética del carro y regresar parte a la línea durante el proceso de frenado.

5.- El rendimiento es mayor, ya que disminuyen las caídas de tensión en la red de alimentación, facilita la aplicación de un control automático, permite el frenado regenerativo aún en bajas velocidades, mayor seguridad de servicio y confiabilidad.

6.- La mayor ventaja del equipo chopper es el ahorro de consumo de energía, que puede ser del 40% al 45% con respecto al reostático.

El control chopper mejora las características de adhesión, reduciendo el deslizamiento al proporcionar un par continuo, eliminando el "jalón" o "jerk". En el sistema de control convencional reostático, las variaciones del par son grandes, debido a las grandes variaciones de la corriente cuando se brinca la muezca al paso superior en el árbol de levas.

En el sistema de control por chopper, el número de los coches motrices puede ser menor comparado con el sistema de control convencional y aún así proporcionar las mismas características de aceleración. Por ejemplo, en el caso del metro la formación de 6 carros motrices y 3 carros remolques pueden proporcionar las mismas características que la formación de los convencionales 8 motrices y 2 remolques.

Para dar una idea del mayor aprovechamiento que se tiene de la energía con este sistema se ilustra la fig. 53.

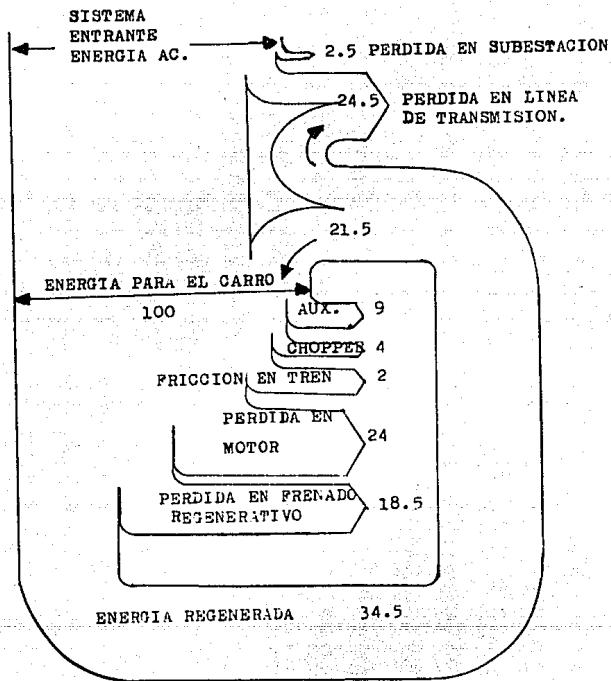


Fig. 53

Flujo de energia en controlador chopper.

DESVENTAJAS.

- 1.- Se deben filtrar las ondulaciones y armónicas de corriente proveniente del sistema de control ya que pueden afectar a los sistemas de señalización y de comunicación. Así mismo, es necesario filtrar las ondulaciones que provienen de la subestación, para no afectar a la conmutación de los tiristores principales.
- 2.- El costo del equipo y otros dispositivos auxiliares, es del orden de 1.3 a 2 veces el costo del control reostático.

CIRCUITO DE CONTROL DEL SISTEMA CHOPPER.

Como se mencionó anteriormente, un motor serie es controlado por una corriente constante hasta que el voltaje total de la fuente es aplicado al motor, así el voltaje del motor sera obtenido en proporción de la velocidad del mismo.

El sistema de control de conducción/extinción (on/off) para un circuito chopper, sera descrito en los parrafos siguientes. El sistema enciende al chopper cuando la corriente alcanza su valor mínimo y lo apaga cuando alcanza su valor máximo, con eso se logra una minimización del rizo del voltaje de la fuente.

Cuando el tren es arrancado, la duración del tiempo ON debe ser acortada y la del OFF alargada, porque la fuerza contraelectromotriz no esta presente en el motor de tracción. Al final de la operación de arranque, la fuerza contraelectromotriz es conciderablemente grande, así que el tiempo ON debe alargarse y el tiempo OFF reducirse.

Los circuitos chopper son controlados por los circuitos de control del gate (compuerta), los cuales comparan las condiciones del circuito principal (detectadas por los transductores de tensión y corriente) con la orden dada por el control del manipulador, determinandose el tiempo óptimo para el ON y OFF del chopper generando así las señales del gate para manejar los tiristores.

En la fig. 54. se muestra un diagrama a bloques del circuito de control del gate.

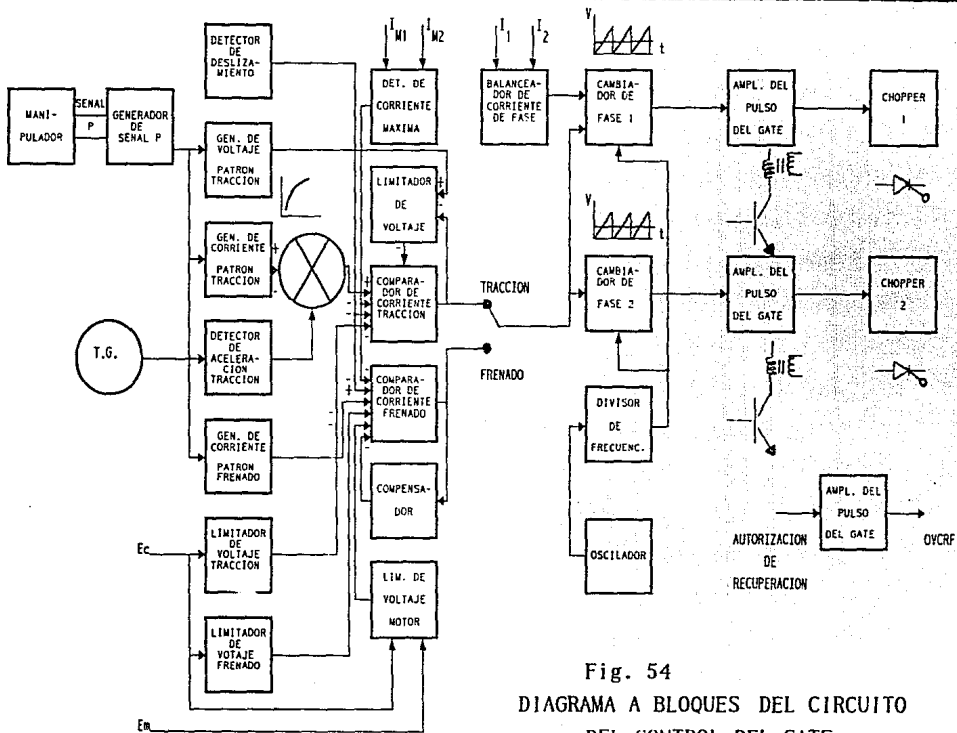


Fig. 54
 DIAGRAMA A BLOQUES DEL CIRCUITO
 DEL CONTROL DEL GATE

CONCLUSIONES

El objeto de estudio del frenado, consiste en determinar un sistema de frenado apropiado para las condiciones de utilización, donde primordialmente se necesita saber si la adherencia rueda-riel es suficiente, éste factor es sumamente importante puesto que no se puede considerar constante, siendo que se ve afectado por el estado de las superficies en contacto; en particular por la humedad y elementos grasos, afectando directamente no solo al frenado sino también al arranque y la aceleración.

A través de diversas tecnologías se está logrando que las locomotoras arrastren cargas mayores, y que los trenes urbanos reduzcan sus distancias de detención, así como el aumento de velocidades máximas de operación.

Por otra parte, por muy moderno ó sofisticado que sea el tren siempre contará con un sistema de frenado mecánico ó electromecánico, ya que éste es imprescindible cuando se conduce a bajas velocidades, cuando el tren permanece en pendientes ó simplemente cuando se le da mantenimiento.

Es usado también durante un frenado de emergencia por tener un tiempo de respuesta menor al eléctrico, aunque de cierto modo este puede ser perjudicial para algunos elementos vitales del tren, implicando con ello un aumento en el costo por mantenimiento.

El freno eléctrico en general presenta algunas ventajas respecto al freno mecánico, pero una de las principales es el ahorro en cuanto al mantenimiento de las partes mecánicas y un ahorro energético para el caso del freno eléctrico regenerativo.

En caso de un sistema de frenado del tipo reostático, éste puede operar hasta velocidades muy bajas, las cuales dependen de las características del generador y la fuente de alimentación, para dar una idea de ésta velocidad citaremos el caso del metro de la ciudad de México, en donde la sustitución de frenos se lleva a cabo aproximadamente a los 18 Km/hr., lográndose un ahorro en zapatas y tambores, así como el de proporcionar cierto confort a los pasajeros.

Con el desarrollo de la electrónica se puede lograr que con equipo convencional de árbol de levas se pudiese lograr recuperar energía hacia la línea, consiguiéndose así ahorro de energía eléctrica de aproximadamente el 15 % en total y una disminución del calentamiento en los túneles.

Posteriormente con el advenimiento de los semiconductores de potencia se comenzó a regenerar energía eléctrica con ayuda de un nuevo equipo llamado chopper y con ésto se consiguió un ahorro entre el 40% y 45% con respecto al consumo reostático, así como una mayor suavidad de marcha ya que no existen los pasos ó muescas del árbol de levas.

Con la conjugación de los frenos mecánico y eléctrico se consigue un máximo confort para los usuarios.

BIBLIOGRAFIA

- MOTORES ELECTRICOS PARA LA INDUSTRIA.
División de Educación Continua Nov.-Dic. 1984.
- FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO EN FRENADO.
STC México Material NM-73.
- AN INTRODUCTION TO RAILWAY BRAKING.
Chapman and Hall.
- GRUPO TRACCION - FRENADO ELECTRICO.
NM - 79/ 127 CNCFSA.
- CONTROL CHOPPER PARA MATERIAL RODANTE.
Melco de México. Dic. 1980.
- EQUIPOS DE CONTROL DE MOTORES DE TRACCION.
Versión MPMA(JH).
- THE STATUS OF ADVANCED PROPULSION SYSTEMS FOR
URBAN RAIL VEHICLES. 1987.
- FRENAIGE SUR SYSTEMES.
France 1984.

- ELECTRIC TRANSPORTATION EQUIPEMENT.
Toshiba Enero 1980
- TRACTION ELECTRIQUE ET THERMO-ELECTRIQUE.
Marcel Tessier 1978.
- ELECTRIC POWER UTILIZATION.
N.N. Hancock 1967.
- CHOPPER CONTROL SYSTEM OF NEW STANDARD CAR
OF TEITO RAPID TRANSIT AUTHORITY.
T. Katta.
- AUTOMATIC, VARIABLE FIELD CHOPPER CONTROL
SYSTEM FOR ELECTRIC RAILCAR.
- RESULT OF DC CHOPPER CONTROLLED TRAIN OPERATION.
T. Katta.
- LE TRACTION ELECTRIQUE.
Marcel Garreau. Edition Scientifique 1978.
- FRICCIÓN DESDE UN PUNTO DE VISTA MICROSCÓPICO.
2 STICK AND SLIP por
Ernest Rabinowres
Scientific American 1956.

- CURSO DE MECANICA TEORICO.

S.M. Targ.

Ed. Mir Moscu 1971.

- CONTROL DE DESLIZAMIENTO DE RUEDA.

Articulo presentado por la

JOINT RAILROAD CONFERENCE 1985.

- FISICA.

Robert Resnick.

Ed. C.E.C.S.A. 1985.