

1  
2 ej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

**Facultad de Estudios Superiores  
Cuautitlán**

**ANALISIS DE LA OPERACION DEL CONTROL  
AUTOMATICO (CHOPPER) DEL SISTEMA MOTRIZ  
DEL METRO DE LA CD. DE MEXICO**

**T E S I S**

Que para obtener el Título de  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

presentan:

**Francisco Avila Medina  
José Luis Alfredo Cote Pérez**

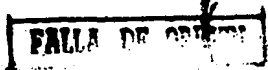


V N A M

Director de Tesis:

Ing. Ricardo J. Ramírez Verdeja

Cuautitlán Izcalli, Estado de México, 1989.





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.

ANALISIS DE LA OPERACION DEL CONTROL AUTOMATICO (CHOPPER)  
DEL SISTEMA MOTRIZ DEL METRO DE LA CIUDAD DE MEXICO.

I N D I C E

N° Página

PROLOGO .....	1
CAPITULO I	
DESCRIPCION DE ELEMENTOS DE CONTROL AUTOMATICO (CHOPPER) DEL SISTEMA MOTRIZ DE UN TREN ELECTRICO DE CORRIENTE DIRECTA.	8
CAPITULO II	
FUNCIONAMIENTO OPERACIONAL POR FASE DEL ALIMENTADOR DE CORRIENTE (CHOPPER) .....	33
CAPITULO III	
PRUEBAS DE VACIO Y CON CARGO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO (CHOPPER) .....	65
CAPITULO IV	
ANALISIS DE LA OPERACION .....	82
CAPITULO V	
OPERACION DEL SISTEMA .....	130
CONCLUSIONES .....	183
BIBLIOGRAFIA .....	186

## PROLOGO

El interés por los equipos de sistemas de transportes eléctricos ha ido desarrollándose constantemente desde hace algunos años, esto es debido a un consumo drástico de ciertos energéticos como son los hidrocarburos.

El acelerado crecimiento de la población en las principales ciudades del mundo trae también como consecuencia la necesidad de satisfacer un mayor número de servicios urbanos como son:

- 1.- ABASTECIMIENTO DE AGUA
- 2.- ENERGIA ELECTRICA
- 3.- HABITACION
- 4.- ESCUELAS
- 5.- ASISTENCIA MEDICA
- 6.- ZONAS DE TRABAJO Y SOBRE TODO "TRANSPORTES"

De este último, el problema de proporcionar un sistema de transporte suficientemente capaz de mover a los habitantes de las ciudades superpobladas, de las áreas urbanas a las zonas en que realizan sus actividades productivas, culturales, sociales y comerciales.

Estas mismas nos conducen a investigar sobre nuevos sistemas de transporte masivos, más eficientes, cómodos, -

económicos, que ahorren energía y principalmente que no -  
contaminen el medio ambiente.

Al inaugurarse en septiembre de 1969 la primera línea de nuestro Metro (Tren Eléctrico), quedó incorporada la Ciudad de México al número creciente de las que cuentan con el más completo de los sistemas hasta ahora conocidos para el Transporte Colectivo (S.T.C.) en una de las grandes concentraciones urbanas en el mundo como lo es el Distrito Federal.

El Metro nació hace más de un siglo en la ciudad de Londres.

La afluencia de personas que necesitaban acudir al centro de la ciudad, en aquellos días la más poblada del mundo, afluencia cifrada en 750 mil personas diarias, dio como consecuencia crear un medio de transporte capaz de trasladar un número mayor de personas diarias, originando la creación de una compañía denominada North Metropolitan Railway Company (Cía. de Vías Férreas Metropolitanas del Norte) del cual surgió el primer tren subterráneo conocido con el nombre de Metropolitano o más brevemente "METRO".

La tracción en aquel primer metro se hacía por medio de locomotoras de vapor, los que utilizaban carbón co-

no combustible, con las fácilmente imaginables molestias - para los usuarios.

Es por eso que con el paso del tiempo surgió la necesidad de crear transportes urbanos diseñados para operar con energía eléctrica, como son: los trolebuses y los trenes eléctricos.

Esto ha tenido gran auge en algunos países del mundo, entre los cuales se encuentra la Ciudad de México.

Tomando en cuenta que nuestra Metrópoli muestra una tasa elevada de crecimiento de población, es de esperar que el problema de transporte urbano aumente en torno proporcional con el incremento demográfico de la ciudad.

Para resolver en gran parte el problema de Transporte, el Distrito Federal cuenta con un sistema de transporte colectivo "METRO", el cual opera a base de tracción eléctrica, y cuyo análisis y funcionamiento se describe en los siguientes capítulos.

En el campo de transporte masivo se entiende por Tracción Eléctrica al medio de desplazarse a base de energía -- por medio de motores rotatorios que tienen su fuente de alimentación en forma de energía eléctrica.

4

Los sistemas de tracción eléctrica se dividen en dos grupos principales:

El de los vehículos que reciben su alimentación eléctrica desde una subestación y a través de una malla o línea de distribución y la de los vehículos que generan o transportan su propia energía.

Para el primer grupo tenemos los sistemas que operan con corriente directa (c.d.) tales como trolebuses, tranvías y trenes urbanos (METRO).

En un principio, la tracción del transporte eléctrico de la Ciudad de México, se hacía por medio de un equipo de comando por contactores que usaban un servomotor eléctrico con el nombre de J.H., esto permitía seleccionar la cantidad de corriente del arranque de los motores por medio de resistencias.

Pero con el paso del tiempo este sistema ha ocasionado infinidad de problemas tanto en su operación como mantenimiento, es por eso que se ha optado por utilizar como medio de control automático de tracción y frenado "EL CHOPPER", que es mucho más seguro, económico y eficiente.

Y que ha servido como tema para el desarrollo de esta tesis (ANÁLISIS DE LA OPERACION DEL CONTROL AUTOMÁTICO)

"CHOPPER" DEL SISTEMA MOTRIZ DEL METRO DE LA CIUDAD DE MEXICO).

El CHOPPER (Alimentador de corriente), es el nuevo sistema de control automático de tracción y frenado que vino a sustituir al equipo anterior llamado J.H.

Debido a que el CHOPPER no tiene elementos exteriores a los motores que disipen energía y a su facilidad de realizar el frenado por regeneración, así como de reducción de partes móviles o mecánicas minimizadas, el consumo de kilowattios hora queda sustancialmente disminuido cuando se emplea esta nueva técnica de control en motores eléctricos.

Como es natural, esta ventaja cobra especial importancia en el caso de sistemas de transporte, donde el número de paradas es muy elevado en áreas metropolitanas.

En función de lo anterior, se ha definido como objetivo de esta tesis; **DESCRIBIR Y ANALIZAR EL FUNCIONAMIENTO DE LA OPERACION DEL CONTROL AUTOMATICO DE TRACCION Y FREADO (CHOPPER) EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE ELECTRICO METRO; para la Ciudad de México.**

Actualmente el metro cuenta con ocho líneas en servicio; a continuación se muestra un cuadro comparativo de cada una de las líneas que existen en la red, así como un cuadro de equipos y partes de carros.



CUADRO COMPARATIVO DE LINEAS EN LA RED

CONCEPTO	LINEA 1	LINEA 2	LINEA 3	LINEA 4	LINEA 5	LINEA 6	LINEA 7	LINEA 9	RED
LONGITUD DE SERVICIO (km)	16.654	20.713	21.276	9.363	14.435	11.434	11.148	9.343	111.366
LONGITUD DE OPERACION (km)	17.702	22.006	22.554	10.747	13.675	13.004	13.134	10.738	123.56
TRAMO ELEVADO (km)	0	0	0	9.435	0	0	0	4.913	14.348
TRAMO SUPERFICIAL (km)	.916	9.456	4.443	1.312	10.724	1.146	0	0	27.997
TRAMO SUBTERRANEO (km)	16.786	17.550	18.145	0	4.351	11.858	13.154	5.825	87.669
ESTACIONES ELEVADAS	0	0	0	8	0	0	0	4	12
ESTACIONES SUPERFICIALES	1	10	4	2	9	1	0	0	27
ESTACIONES SUBTERRANEAS	19	14	17	0	4	10	10	5	79

\* LINEA 8 EN PROYECTO.

La longitud de los andenes en la Red varía de un mínimo de 150 mts. a un máximo de 170 mts.

A continuación se muestra un cuadro de equipos y partes de los carros.

EQUIPOS Y PARTES DE LOS CARROS

	"M"	"N"	"R"
MOTORES DE TRACCION	4	4	-
COMPRESORES	-	-	1
MOTOR-ALTERNADOR	-	-	1
BANCO DE BATERIAS	-	-	1
TUBOS FLUORESCENTES 40w	22	24	24
TUBOS FLUORESCENTES 20w	2	-	-
PUERTAS POR LADO	4	4	4
ESCALERAS DE SEGURIDAD	1	1	1
VENTANAS POR LADO	3	3	3
ASIENOS DOBLES	12	12	12
ASIENOS SENCILLOS	14	15	15
RUEDAS DE SEGURIDAD	8	8	8
RUEDAS GUIA	8	8	8
RUEDAS PORTADORAS	8	8	8
ESCOBILLAS POSITIVAS	4	4	-
ESCOBILLAS NEGATIVAS	2	2	-
ESCOBILLAS DE TIERRA	2	2	4

## CAPITULO I

DESCRIPCION DE ELEMENTOS DE CONTROL AUTOMATICO (CHOPPER)  
DEL SISTEMA MOTRIZ DE UN TREN ELECTRICO DE CORRIENTE DIRECTA

## 1.1.- SEMICONDUCTORES DE POTENCIA

## 1.1.1.- EL DIODO

- a).- ESTADO DE CONDUCCION
- b).- ESTADO DE BLOQUEO
- c).- CARACTERISTICA SIMPLIFICADA

## 1.1.2.- EL TIRISTOR

- 1.- ESTADO DE BLOQUEO
- 2.- ESTADO DE CONDUCCION
- 3.- ESTADO DE APAGADO
- 4.- CARACTERISTICA SIMPLIFICADA

## 1.1.2.1.- CARACTERISTICAS ESTATICAS DEL TIRISTOR

## 1.1.2.2.- CARACTERISTICAS DINAMICAS DEL TIRISTOR

## 1.1.2.3.- CARACTERISTICAS TERMICAS DEL TIRISTOR

## 1.1.2.4.- INTERCONEXION DE SEMICONDUCTORES

## 1.2.- EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

## 1.2.1.- GANANCIA DE VOLTAJE DE MALLA ABIERTA

## 1.2.2.- COMPARADORES

## 1.3.- MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

## 1.3.1.- PAR DESARROLLADO POR UN MOTOR ELECTRICO

## 1.3.2.- FUERZA CONTRAELECTROMOTRIZ

## 1.3.3.- DISPOSITIVOS DE ARRANQUE DE LOS MOTORES

1.3.4.- FRENADO ELECTRICO DE MOTORES DE CORRIENTE  
DIRECTA

### 1.1.- SEMICONDUCTORES DE POTENCIA

La descripción de los elementos, a partir de las propiedades de los materiales semiconductores, en la que se explica el funcionamiento de los componentes electrónicos de potencia, sus características, las limitaciones a respetar en su empleo. El estudio de los circuitos con semiconductores, como en los "alimentadores de corriente", constituidas por resistencias, bobinas, condensadores y por receptores activos o pasivos (tipo de carga).

Las propiedades de los semiconductores de silicio -- son tan interesantes que ingenieros e investigadores han creado una gran cantidad de esquemas de aplicación. Ante la cantidad de propuestas, era difícil hacer unos años las ideas claras.

Sin embargo con la experiencia industrial se ha hecho posible, previa selección de tener un número reducido de soluciones interesantes por sus costos y prestaciones.

Hoy en día se pueden presentar de una forma lógica y sencilla los principales circuitos que utilizan semiconductores de potencia, a partir de las funciones que realizan.

Como es el caso del desarrollo de esta tesis, cuyo objetivo es el de describir y analizar el funcionamiento -

de la operación del control automático de tracción y frenado (CHOPPER) o "alimentador de corriente" del sistema motriz del metro de la Ciudad de México (Material MP 82).

La puesta a punto de los semiconductores, diodos y -- tiristores de silicio, permite el control de intensidades elevadas, ha dado una importancia considerable a la técnica de los rectificadores de potencia en el campo de la electricidad industrial. A esta técnica se le llama habitualmente Electrónica de Potencia.

#### 1.1.1.- EL DIODO

El Diodo es el semiconductor elemental constituido -- por una sola unión PN.

En la figura 1.1 se muestra su representación simbólica y a continuación se explica sus estados de conducción, bloqueo y su característica simplificada.

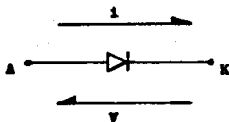


Fig. 1.1 Representación simbólica de el diodo

a).- ESTADO DE CONDUCCION

Cuando el circuito en el que está conectado el diodo tiende a hacer pasar una corriente en sentido directo, es decir, del ánodo A al cátodo K, el diodo conduce.

La corriente  $i$  positiva toma entonces un valor que viene fijado por el resto del circuito. Se debe procurar que el valor medio de  $i$  no sobrepase la corriente directa media que el diodo puede soportar.

La tensión  $V$  en los bornes del diodo, igual a  $V_A - V_K$ ; tiene un valor positivo pequeño, del orden de 1 voltio, que en la primera aproximación se puede despreciar frente a las otras tensiones que se tenga en el circuito.

b).- ESTADO DE BLOQUEO

Cuando una tensión negativa aplicada en los bornes del diodo tiende a hacer pasar la corriente en sentido inverso el diodo no conduce, es decir está bloqueado.

La tensión inversa puede tomar, bajo el efecto del resto del montaje, valores elevados. Se debe procurar que esta tensión se mantenga por debajo de la tensión máxima inversa que el diodo pueda soportar.

Como la corriente inversa es muy pequeña comparada -

con las corrientes que se encuentran en la fase de conducción, y en la primera aproximación se pueden despreciar.

c).- CARACTERISTICA SIMPLIFICADA

En el análisis de circuitos, algunas veces es conveniente suponer un diodo perfecto, es decir, con caída de tensión directa y corriente inversa nulas.

Se comporta como un interruptor perfecto, cerrado o abierto, según que la corriente intente atravesarlo en sentido directo o inverso como se muestra en la fig. 1.2

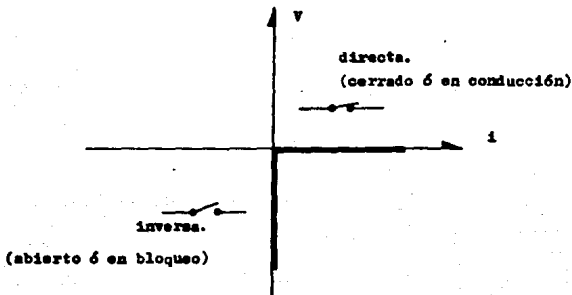


Fig. 1.2 Característica simplificada del diodo ideal.

### 1.1.2 EL TIRISTOR

El tiristor es la mejor aproximación al interruptor ideal. Es un semiconductor constituido por tres uniones y cuenta además del ánodo A y el cátodo K, con un electrodo de disparo o puerta G, como se muestra en la siguiente figura.

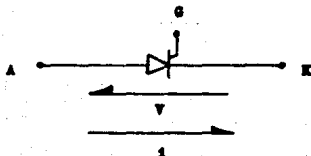


Fig. 1.3 Representación simbólica de el tiristor.

Las características de funcionamiento principal del tiristor son:

- 1.- El tiristor está bloqueado, en estado de no conducción, mientras la tensión V aplicada de ánodo A a cátodo K sea negativa.

Cuando V toma valores positivos, el tiristor continúa en "estado de bloqueo".

- 2.- Cuando V es positiva y se hace pasar un impulso de corriente positiva entre la puerta G y el cátodo K, el tiristor pasa al "estado de conducción".



Una vez disparado el tiristor, la puerta pierde todo poder de control sobre el mismo.

- 3.- Mientras el tiristor es conductor, se comporta como un diodo y sólo se bloquea cuando la corriente directa que circula a través de él se hace inferior a un valor pequeño llamado "corriente de mantenimiento", pasando al "estado de apagado".

4.- Característica simplificada

Para el análisis de circuitos con tiristores, es también conveniente en ocasiones suponer la caída de tensión directa y la corriente inversa nulas. Esta característica consta de tres zonas, como se muestra en la siguiente figura.

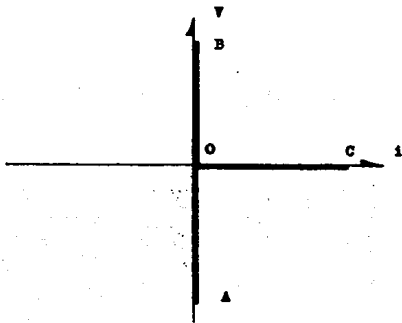


Fig. 1.4. Característica simplificada del tiristor ideal.

- Zona OA, tensión V negativa; tiristor bloqueado.
- Zona OB, tensión V positiva, sin impulso de disparo en la puerta: tiristor bloqueado.
- Zona OC, después de enviar un impulso de disparo en la puerta siendo la tensión V positiva: tiristor en conducción.

#### 1.1.2.1.- CARACTERISTICAS ESTATICAS DEL TIRISTOR

Generalmente se caracteriza a los tiristores y diodos por el comportamiento que tienen tanto en tensión como en corriente.

La característica tensión-corriente de un tiristor, está representada en la siguiente figura.

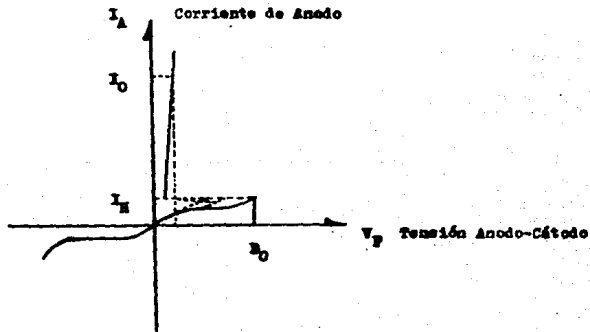


Fig. 1.5. Característica tensión-corriente de un tiristor.

En ella se representa la curva de corriente  $I_A$  en función de la tensión ánodo-cátodo. Se observa que para tensiones inferiores a las máximas, el tiristor presenta una gran resistencia pero, sin embargo, deja pasar una pequeña corriente de fuga  $I_H$ . Esta corriente varía poco con la tensión, pero crece  $I_0$  con la temperatura del tiristor. Si se polariza el tiristor en inversa y se rebasa la tensión máxima inversa, se llega a la región de avalancha, donde la corriente inversa crece, pudiéndose provocar la destrucción del elemento.

Al polarizar el tiristor en directa y rebasar la tensión directa de ruptura, éste se desbloqueará. Al provocar de esta forma la conducción del tiristor, se pueden tener daños importantes en él.

Si se aplica una corriente de mando en la puerta, se reduce el voltaje de ruptura  $V_{B_0}$ . Esta corriente tiene un valor mínimo para el cual el tiristor pasa a su estado de conducción. Por otro lado, existe una corriente mínima de ánodo para mantener el tiristor en estado de conducción, a esta corriente se le llama corriente de mantenimiento.

#### 1.1.2.2 CARACTERISTICAS DINAMICAS DEL TIRISTOR

Si se aplica un impulso de corriente positiva suficiente en la puerta G de un tiristor sometido a una tensión ánodo-cátodo positiva, la puesta en conducción del tiristor tiene lugar con un cierto retardo, llamado tiem-

po de disparo,  $t_{gt}$ , el cual se define como el tiempo que transcurre desde el momento en que se aplica el impulso a la **puerta** hasta el momento donde la caída de tensión ánodo-cátodo alcanza el 10% de su valor inicial.

En los montajes que exigen gran precisión en el instante de disparo, por ejemplo, en la puesta en serie o en paralelo de tiristores, es conveniente tener impulsiones - con un valor de dos a cinco veces el valor mínimo de la corriente de disparo.

La característica de bloqueo de los tiristores, llamado tiempo de recuperación  $t_q$  es el tiempo transcurrido entre el instante donde la corriente directa es nula y el instante en el que el tiristor es capaz de soportar una --tensión directa sin volver a encender.

Este tiempo de recuperación varía enormemente de un tiristor a otro, aún siendo de una misma serie. El valor típico pero de gran potencia es de 300  $\mu$ seg. pero puede descender hasta 10  $\mu$ seg. Para ciertos tiristores especiales llamados rápidos.

El tiempo de recuperación es función de un gran número de parámetros tales como la temperatura de la juntura, corriente, tensión inversa. La temperatura de la juntura afecta considerablemente el tiempo de recuperación --

del tiristor.

#### 1.1.2.3 CARACTERISTICAS TERMICAS DEL TIRISTOR

Los límites de funcionamiento de un tiristor están de finidos esencialmente por la temperatura de la juntura máxi ma admisible. Esta es de 125°C.

La energía eléctrica disipada dentro del tiristor, - cualquiera que sea el sentido de corriente, aparecen bajo - la forma de una energía térmica a nivel de junturas de tal suerte que la potencia total perdida dentro del cristal pro voca una elevación de la temperatura en la juntura.

Este valor no representa más que una mínima parte de la potencia puesta en juego dentro del circuito, pero no - debe olvidarse que la temperatura ambiente representa el - nivel energético a partir del cual se efectúa la elevación de la temperatura de juntura. Por consecuencia se puede - alcanzar un valor relativamente elevado, especialmente si recordamos que las temperaturas del ambiente industrial -- son del orden de 50° a 60°C.

#### 1.1.2.4 INTERCONEXION DE SEMICONDUCTORES

Con el propósito de manejar potencias más elevadas, - frecuentemente se conectan en paralelo o (en serie), los

tiristores o diodos. Al realizar dicha conexión es necesario asegurar que las corrientes que circulan por ellos sean iguales. Como en el caso de dos diodos conectados en paralelo, la caída de tensión en los dos diodos será la misma, pero las corrientes que circularán por cada una de ellos, dependerá de la impedancia del circuito y sobre todo de las características de los mencionados elementos.

Debido a que cada diodo tiene su característica propia, las corrientes que circularán por ellos al conectarlos en paralelo generalmente no serán iguales.

El procedimiento más eficaz por equilibrar las corrientes, consiste en acoplar inductores a la manera de un transformador, por lo que toda variación de corriente en cualquier diodo, tiene consigo la misma variación en el diodo vecino y consecuentemente en todos los demás.

Al conectar en serie diodos o tiristores es necesario que las tensiones en los bornes de dichos elementos sean compatibles con sus características.

El equilibrio estático es relativamente simple. En efecto, dado que las impedancias de los diodos y tiristores en su estado no conductor son muy grandes del orden de

los megahoms, basta con poner una resistencia de algunas -  
centenas de kilohoms en los bornes de los semiconductores  
para obtener un divisor potenciométrico suficiente.

Durante el disparo o extinción de tiristores conec-  
tados en serie, el equilibrio estático es insuficiente. --  
Con el objeto de asegurar el equilibrio dinámico, se conec-  
ta en serie con el circuito un inductor  $L_2$  y en los bornes  
de cada semiconductor un circuito RC. Así el disparo o ex-  
tinción de un tiristor, se tiene un escalón de tensión que  
repercute sobre los otros elementos, pero la variación de  
tensión que se representa en ellos es atenuada por la pre-  
sencia de la inductancia  $L_2$  y los circuitos RC. La ten-  
sión en los bornes de los elementos no disparados (o apa-  
gados) crece con una pendiente, función de la tensión to-  
tal y de los valores R y C. Es entonces necesario provo-  
car que el defasamiento entre los tiempos de disparo y -  
entre los tiempos de extinción sea suficientemente peque-  
ño para no provocar sobretensiones peligrosas.

## 1.2. EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

El amplificador operacional es un dispositivo extra-  
ordinariamente eficiente y versátil; para su utilización no -  
es necesario conocer su funcionamiento interno, es sufi-  
ciente saber a que correspondan los diferentes bornes que  
contiene, así como sus características de operación. La

precisión y flexibilidad del amplificador operacional es resultado directo de uso de la realimentación negativa. -- Generalmente hablando, los amplificadores que emplean realimentación tienen características de operación superiores, pero ganancia limitada. Con suficiente realimentación, -- las características del amplificador de malla cerrada son función de los elementos de realimentación. Por lo tanto, la amplificación a casi cualquier grado de precisión puede ser logrado fácilmente.

La representación esquemática más utilizada es la que se muestra en la figura siguiente. En ella solamente se representan las terminales de entrada y salida; por la simplicidad no se representan las terminales de alimentación.



Fig. 1.6. Representación esquemática del amplificador operacional.

Los amplificadores operacionales poseen generalmente dos entradas que trabajan en diferencial; una inversor -- llamada así porque las polaridades de la señal que se le -



aplica es invertida por el amplificador; la otra no inversora, denominada de esta manera porque el amplificador no modifica la polaridad de la señal en ella aplicada.

Generalmente la salida es la única pero en algunos tipos de amplificación puede ser diferencial.

Para que se pueda considerar un amplificador operacional como ideal, debe cumplir las siguientes condiciones:

- Ganancia infinita.
- Impedancia de entrada infinita, a fin de no sobrecargar los circuitos de etapas anteriores.
- Impedancia de salida nula, a fin de que la tensión de salida no sea modificada por la impedancia de la carga.
- Banda pasante infinita, a fin de permitirle funcionar a cualquier frecuencia sin provocar atenuaciones a frecuencias elevadas.
- Tensión de salida nula en ausencia de señal de entrada.

Aunque estas características ideales no se han podido alcanzar, ha sido posible implementar amplificadores con características suficientemente buenas para poder, en ciertos casos, despreciar su influencia sobre los circuitos exteriores.

## 1.2.1. GANANCIA DE VOLTAJE DE MALLA ABIERTA

La ganancia de voltaje de malla abierta y de un amplificador operacional, es la ganancia que se tiene cuando se utiliza realimentación negativa, en la siguiente figura tenemos que:

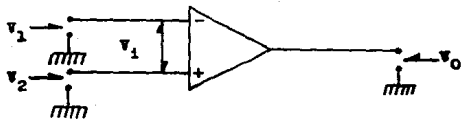


Fig. 1.7 Representación del amplificador operacional para la ganancia de voltaje de malla abierta.

Como se mencionó anteriormente, para un amplificador operacional ideal esta ganancia es infinita; entonces:

$$G = \frac{V_O}{V_i} = \frac{V_O}{V_1 - V_2} = -\infty$$

El signo negativo significa que la señal de entrada  $V_1$  y la de salida  $V_O$  están fuera de fase.

Despejando  $V_i$  de la ecuación anterior tenemos:

$$V_i = \frac{V_O}{G}$$

como  $G \rightarrow \infty$ ,  $V_i \rightarrow 0$

Por lo que se concluye que si la ganancia de malla abierta  $G$  es muy grande, el valor de  $V_i$  debe ser muy pequeño. Prácticamente  $V_i$  es tan pequeño que se puede considerar que no existe diferencia entre la entrada inversora y la no inversora. Por esto mismo, la corriente que entra al amplificador por dichas terminales es nula.

### 1.2.2 COMPARADORES

Dado que los amplificadores operacionales no tienen una ganancia de malla abierta elevada, es suficiente una pequeña diferencia de tensión entre sus entradas para que la salida del amplificador pase de  $-V_{sat}$  a  $+V_{sat}$ . Un comparador es esencialmente un montaje en el que una tensión de referencia es aplicada sobre una de las entradas, mientras que la tensión a comparar es aplicada en la otra (ver fig. 1.8).

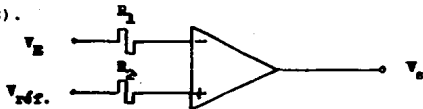


Fig. 1.8 Amplificador operacional en el que se comparan dos tensiones

Para que la tensión de salida del comparador cambie de estado, es decir, para que pase de  $-V_{sat}$  a  $+V_{sat}$ , o viceversa, es necesario que la tensión de entrada rebase una cantidad igual a  $V_{smax}/G$  un límite de voltaje prefijado

( $V_{smax}$ : tensión máxima de salida del amplificador y  $G$ : ganancia de malla abierta).

El tiempo en que cambia de estado la tensión de salida es función de la banda pasante del amplificador; este tiempo depende igualmente de la saturación más o menos avanzada del amplificador.

La ganancia de un comparador puede aún ser aumentada añadiéndole una cierta cantidad de realimentación positiva. Se tiene entonces el montaje de la figura 1.9 que no difiere de un comparador ordinario más que por la malla de realimentación positiva  $R_3$ .

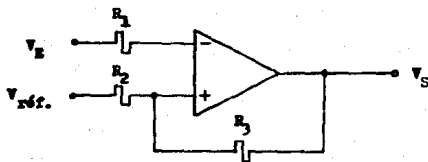


Fig. 1.9 Comparador con realimentación positiva

Debido a esta realimentación, la señal de salida presenta una cierta histerisis, es decir que el cambio de estado de la salida no se produce exactamente por el mismo valor de la tensión de entrada, ya sea que la señal crezca o decrezca. Con este tipo de montaje se obtiene estabilidad de la tensión de salida.

### 1.3. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

Los dispositivos rotatorios de conversión de energía electromecánica son conocidas popularmente como máquinas rotatorias. Están clasificadas como máquinas de corriente directa si su salida son en corriente directa o si la energía de entrada a las máquinas proviene de una fuente de corriente directa. Se llaman máquinas de corriente alterna si sus salidas son periódicas o si la energía primaria de entrada proviene de una fuente de corriente alterna.

Una máquina rotatoria se llama generador, si convierte energía mecánica en energía eléctrica, y se llama motor si convierte energía eléctrica en mecánica. En principio la misma máquina puede ser usada, ya sea como motor o como generador. Tanto la acción generadora como la motora se presentan en una máquina independientemente de que sea usada como generador o como motor. En otras palabras, mientras la función de un motor, es la de producción de un par mecánico, se generan fuerzas electromotrices en ciertas partes del dispositivo debido al movimiento. Similarmente, mientras la función de un generador es la generación de la fuerza electromotriz (f.e.m.) se produce un par mecánico que se opone al movimiento en ciertas partes de la máquina.

Cuando el motor gira, el inducido produce energía -- mecánica a expensas de la energía eléctrica. Por consi--

guiente, ha de **producir** una fuerza contra electromotriz; esta es una f.e.m. inducida. Las bobinas de excitación, - por el contrario, son fijas y se comportan como una resistencia pura.

Si el inducido y las bobinas de excitación (inductor) se conectan en serie, se tiene un motor de excitación serie; si se conectan en paralelo se tiene un motor en derivación (shunt). En algunos motores, las bobinas de excitación tienen dos devanados uno en serie con el inducido y otro en paralelo con él; el motor se denomina entonces motor compuesto (compound).

Los motores de corriente continua se usan extensamente en sistemas de control como dispositivos de posición. - En este caso, se requiere frecuentemente un control preciso de su velocidad y par sobre un rango amplio. Los motores usados como dispositivos de posición pueden considerarse lineales, puesto que el diseñador hace todos los esfuerzos que permiten asegurar que operarán en el rango lineal de sus características de magnetización, de suerte que el campo magnético es directamente proporcional a la corriente de excitación y no hay histéresis.

#### 1.3.1. PAR DESARROLLADO POR UN MOTOR ELECTRICO

Si una espira por la que circula una corriente y -

está en presencia de un campo magnético, experimentará un par cuya magnitud variará en función de la posición de la misma haciéndola girar. Para que la dirección del par -- sea siempre la misma se requiere invertir la dirección de la corriente en los puntos en que el par se anula, para lograr la inversión del sentido de la corriente de los motores de corriente continua se utiliza un conmutador o colector.

Para desarrollar un par que actúe continuamente en una dirección es necesario aumentar el número de espiras y conectarlas una al lado de la otra, constituyendo con esto el inducido, el par desarrollado en estas condiciones se mantiene prácticamente constante para valores constantes -- tanto de intensidad de corriente en las bobinas como en el flujo principal.

### 1.3.2 FUERZA CONTRAELECTROMOTRIZ

Los conductores situados en la superficie del motor, además de conducir una corriente y desarrollar así un par motor, cortan un flujo; por lo tanto, inducen una fuerza electromotriz (f.e.m.), como esta fuerza actúa de modo -- que se opone al paso de la corriente en la bobina del motor, se denomina también fuerza contraelectromotriz (f.c.e.).

La fuerza contraelectromotriz juega un papel muy importante en el modo de operación de un motor. Para expli-

carlo se considera el rotor de un motor cuyas bobinas tengan una resistencia pequeña. Si se conecta a las bobinas una fuente de energía, circulará por ella una gran corriente, limitada tan sólo por la poca resistencia de las mismas; esto mientras el rotor esté en reposo. Tan pronto como el rotor inicie su giro dentro del campo magnético estático producido por las bobinas inductoras de el motor, se induce una f.c.e.m. que se opone a la tensión externa aplicada. Si el motor gira en vacío, la f.c.e.m. reduce la corriente a un valor menor, justo para suministrar la energía consumida por la pérdida de rozamiento y resistencia eléctrica. Si el motor arrastra una carga, tiende a disminuir su velocidad produciéndose la consiguiente reducción en la f.c.e.m. lo que permite que el motor tome más energía eléctrica que le permita arrastrar dicha carga mecánica.

Considerando esto último, es fácil explicarse que al arrancar un motor se tenga una gran demanda de energía eléctrica.

### 1.3.3. DISPOSITIVOS DE ARRANQUE DE LOS MOTORES

Durante el arranque de un motor de corriente continua deberá limitarse la corriente del mismo al fin de evitar problemas tales como:



- 1.- Interferencia con la línea en forma de una excesiva -  
caída de voltaje, la cual podría afectar a otro equi-  
po u otros consumidores.
- 2.- Daños al mismo motor por una excesiva corriente.
- 3.- Daños a la carga conectada, debido a una aceleración -  
demasiado grande.

Esto puede tomarse como una incomodidad inaceptable -  
para los pasajeros de trenes o elevadores.

Esta limitación se logra utilizando dispositivos au-  
xiliares llamados arrancadores y éstos pueden ser disipa--  
tivos y no disipativos.

#### a).- ARRANCADORES DISIPATIVOS

Los arrancadores disipativos son fabricados a base -  
de reostatos que se conectan entre el motor y la línea y -  
es eliminado paulatinamente a medida que aumenta la veloci-  
dad del inducido. Se les llama **disipativos** por el consu-  
mo de energía que se produce en ellos al ser utilizados.

#### b).- ARRANCADORES NO DISIPATIVOS

Los arrancadores no disipativos realizan la misma -  
función que los anteriores, haciendo variar el voltaje de  
alimentación del motor desde un valor mínimo al valor no-  
minal, conforme aumenta su velocidad, sin consumir ener-  
gía.

#### 1.3.4. FRENADO ELECTRICO DE MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

En muchas aplicaciones es necesario de proveer de un par de frenado a los equipos manejados por motores eléctricos. Deben tomarse en cuenta dos condiciones: primero, - que el sistema involucra sólo la energía cinética de las partes en movimiento, requiriéndose llevarlo al reposo. -- Segundo que el sistema puede también involucrar energía potencial usualmente gravitacional, la cual puede impulsar al sistema posiblemente a una velocidad excesiva. Un tren bajando una pendiente, un elevador cargado, una grúa bajando una carga pesada, son ejemplos de este segundo punto. - No obstante es necesario llevar el sistema al reposo y es necesario proporcionar un par de frenado por pérdidas relativamente grandes de tiempo para limitar la velocidad del mismo.

Un par de frenado puede ser proporcionado por frenos mecánicos o electrodinámicos. El frenado eléctrico tiene varias ventajas sobre el mecánico. Por ejemplo, se requiere poco mantenimiento, ya que el frenado mecánico requiere ajuste o reemplazo de piezas, no produce suciedad, y el uso de frenos mecánicos produce polvo; el calor puede producirse en un lugar conveniente, o en algunos casos, la energía del sistema puede ser recuperada en lugar de ser disipada en forma de calor; el frenado eléctrico es sua-

ve y sin jalneos. Sin embargo es difícil que el frenado eléctrico pueda proporcionar convenientemente un par de retención, por lo que se requiere contar también con un frenado mecánico, obteniendo de esta forma un frenado -- electromecánico.

a).- FRENADO REGENERATIVO

El frenado regenerativo o por recuperación de energía a la red, se logra operando el motor como generador conectado a la fuente de alimentación del sistema; de esta forma, la energía mecánica es transferida a energía -- eléctrica y regresada a la fuente de alimentación para -- ser reutilizada.

b).- FRENADO REOSTATICO

El frenado reostático o dinámico, se obtiene operando el motor como generador, de tal forma que la energía -- mecánica se transforma en energía eléctrica, pero en lugar de regresarla al sistema como una regeneración, se disipa en forma de calor en resistencias conectadas al motor como una carga eléctrica.

CAPITULO II  
FUNCIONAMIENTO OPERACIONAL POR FASE DEL ALIMENTADOR  
DE CORRIENTE "CHOPPER"

- 2.1.- INTRODUCCION A LA OPERACION
  - 2.1.1.- PRINCIPIO UTILIZADO PARA BAJAR LA TENSION
  - 2.1.2.- DIAGRAMA UTILIZADO EN TRACCION
  - 2.1.3.- DIAGRAMA UTILIZADO EN FRENADO
- 2.2.- EQUIPO DE TRACCION Y FRENADO DE AUTOMOTRICES A CORRIENTE CONTINUA
  - 2.2.1.- PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL ALIMENTADOR DE CORRIENTE
    - 2.2.1.1.- MONTAJE SERIE
    - 2.2.1.2.- MONTAJE PARALELO
- 2.3.- ALIMENTADOR DE CORRIENTE A FRECUENCIAS SUBMUL-  
TIPLAS Y PARAMETRADAS UTILIZADO EN EL METRO  
DE LA CIUDAD DE MEXICO
  - 2.3.1.- EL FILTRO DE ENTRADA
  - 2.3.2.- ESQUEMA DEL ALIMENTADOR DE CORRIENTE TRIFASI-  
CA UTILIZADO
- 2.4.- ELEMENTOS QUE INTEGRAN O FORMAN EL CIRCUITO  
DE POTENCIA
  - 2.4.1.- FILTRO DE LINEA Lo y Co.
  - 2.4.2.- MOTORES DE TRACCION
  - 2.4.3.- REACTORES DE ALIZAMIENTO
  - 2.4.4.- EL CHOPPER
  - 2.4.5.- FUSIBLE, INTERRUPTORES DE PROTECCION, CON-  
MUTADORES Y ELEMENTOS DE MEDICION
- 2.5.- CARACTERISTICAS DEL ALIMENTADOR DE CORRIENTE  
(CHOPPER) PARA EL METRO DE LA CIUDAD DE MEXICO
  - 2.5.1.- CARACTERISTICAS DE LOS CARROS
  - 2.5.2.- CARACTERISTICAS DE LOS MOTORES DE TRACCION
  - 2.5.3.- CARACTERISTICAS DEL CHOPPER

## 2.1.- INTRODUCCION A LA OPERACION

En este capítulo se dará una definición, así como también una breve explicación del funcionamiento operacional por fase del sistema de control automático en C.D. -- ("CHOPPER").

El CHOPPER es un "alimentador de corriente directa" a base de semiconductores de potencias; su funcionamiento puede compararse a la de un transformador en relación variable, pero en corriente directa. Es decir, transforma un voltaje de corriente directa constante (voltaje de línea), a un voltaje de corriente directa variable. Esto último se aplicará a los motores eléctricos de tracción del tren.

### 2.1.1.- PRINCIPIO UTILIZADO PARA BAJAR LA TENSION

El principio utilizado para bajar la tensión o para variar el valor medio  $U_m(t)$  de la tensión  $U(t)$  en bornes de una carga, consiste en intercalar un interruptor estático H en serie entre una fuente de tensión E de c.c., una carga inductiva-resistiva, un diodo D en paralelo a esta última; como se muestra en la fig. 2.1.a.

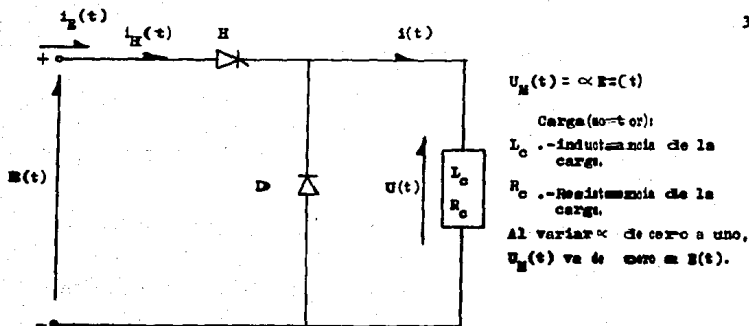


Fig.2.1.a Esquema del principio para bajar la tensión (conexión serie del interruptor estático H).

El interruptor H se cierra regularmente a intervalos de tiempo y queda cerrado durante un tiempo  $t_1 = \alpha T$ , donde la variación de la relación de conducción cíclica va de  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Siendo  $\alpha T$  el tiempo de duración del intervalo de conducción. Así pues, la carga es sometida a una tensión  $E(t)$  durante un intervalo de período  $T$  y se abre el circuito durante un tiempo  $(1 - \alpha) T$ . Debido a que la carga es inductiva la corriente  $i(t)$  no desaparece en el tiempo  $t \geq \alpha T$ .

El diodo D llamado diodo de vía libre, permite la circulación de la corriente en la carga cuando el interruptor está abierto y si la constante de tiempo  $L_c / R_c$  de la carga es grande en relación al tiempo  $t$ , la corriente no se anulará en ésta.

El interruptor estático H y el diodo de vía libre D son complementarios:

- Si H está cerrado, D está bloqueado; se aplica la tensión  $E(t)$  de la fuente a la carga.
- Si H está abierto, D está conduciendo; se pone la carga en cortocircuito.

La presencia del diodo de vía libre D es indispensable, de lo contrario al abrirse el interruptor estático H exigiría la disipación de la energía almacenada en la inductancia de la carga. Esta inductancia hace que la corriente  $i(t)$  en la carga sea mucho menos ondulante que la tensión  $U(t)$ . Si no fuera suficiente, se debería aumentar mediante una inductancia de alizamiento de la corriente  $i(t)$

La tensión media aplicada a la carga es  $U_H(t) = \alpha E(t)$  que determina el valor de la corriente en la carga. Obviamente, variando la relación de conducción cíclica  $\alpha$  se puede ajustar la tensión media a los bornes de la carga.

En la fig. 2.1b se muestra la forma de onda idealizada de la tensión  $U(t)$ , igual a  $E(t)$  ó cero, según el interruptor estático H ó el diodo de vía libre D están cerrados y la de la corriente  $i(t)$  que circula hacia la carga, así como  $i_H(t)$  que es la corriente que circula a través del interruptor estático H.

La corriente  $i_E(t)$  es la corriente que suministra la fuente de tensión  $E(t)$  de corriente continua y que puede producir variaciones bruscas, originando como consecuencia sobretensiones en la inductancia de la fuente  $E(t)$ .

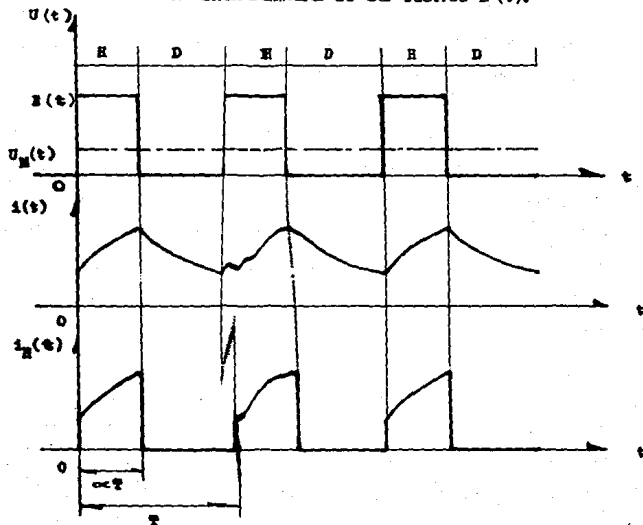


Fig. 2.1b Forma de onda idealizada de la tensión  $U(t)$  igual a  $ES(t)$  ó a cero, según H ó D estén cerrados.

La relación óptica , puede regularse por medio de una realimentación a partir de una referencia del motor y de la medida directa de este par, en caso de que la carga sea un motor.



"El alimentador de corriente permite entonces alimentar una carga a tensión variable a partir de una tensión continua".

Con el control del interruptor estático H y que permite reducir en forma continua la tensión  $U_M(t)$  aplicada a la carga; conviene mencionar que se puede controlar de dos formas diferentes:

- Seleccionando una frecuencia de segmentación o recorte fija  $f = \frac{1}{T}$  y variar la duración de cierre del interruptor estático H de 0 a T.

- Seleccionando una duración de cierre T fija o variando la frecuencia de segmentación o recorte.

El uso de interruptores estáticos permite su control por medio de frecuencias lo suficientemente elevadas que hacen que la corriente en la carga sea casi constante, sin necesidad de usar inductancias demasiado grandes.

Ahora bien, si intercalamos ese mismo interruptor estático H en paralelo a los bornes de una fuente de corriente de tensión media entre bornes  $U_M(t)$ , podrá alimentar una fuente de tensión cuyo valor  $E(t)$  es superior a  $U_M(t)$ , como se muestra en la fig. 2.1c.

Se dice entonces que una generatriz o una carga es de corriente cuando la reactancia interna se opone a toda variación brusca de corriente  $i(t)$  que lo atraviesa.

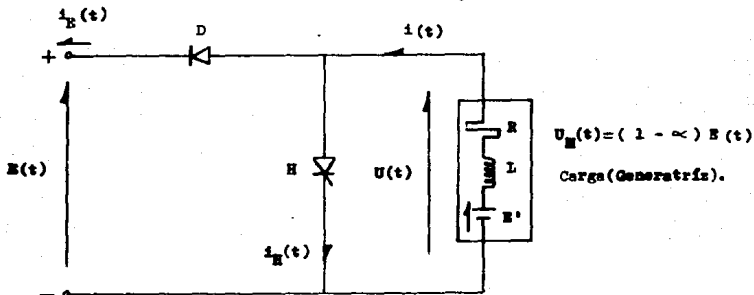


Fig. 2.1c. Esquema del principio para bajar la tensión (conexión paralelo del interruptor estático  $H$ ).

Este es el caso de la máquina de corriente continua - debido a la inductancia del circuito de su inducido. Además, esta inductancia se aumenta añadiendo una bobina de -- alizado para reducir la ondulación de  $i(t)$ .

Un aparato o red visto desde sus bornes, se denomina fuente cuando puede funcionar como generatriz o como carga según  $T_{me}$  esté dando o recibiendo energía eléctrica.

El montaje de la fig. anterior se utiliza sobre todo en frenado con recuperación de la máquina de corriente con-

tinua. Entonces funciona como generatriz dando corriente a la fuente que alimentaba mientras funcionaba como motor.

Para calcular la aproximación de la tensión  $U_M(t)$  respecto a  $E(t)$  se desprecia la resistencia de la fuente de corriente, teniendo sólo en cuenta su f.e.m.  $E'(t)$  y su inductancia  $L$ .

La fuerza electromotriz es entonces:

$$E'(t) = (1-\alpha) E(t)$$

Que es la ecuación que relaciona la tensión  $U_M(t)$  con la fuerza electromotriz  $E'(t)$  y que alimenta a una fuente de tensión  $E(t)$ , cuyo valor es superior a  $U_M(t)$  como  $L di(t)/dt$  tiene un valor medio nulo por período, la tensión  $U(t)$  tiene un valor medio igual a  $E'(t)$ :

$$U_M(t) = (1-\alpha) E(t)$$

En la fig. 2.1d se muestra la forma de onda de la tensión  $U(t)$  y de las corrientes  $i(t)$  e  $i_M(t)$ .

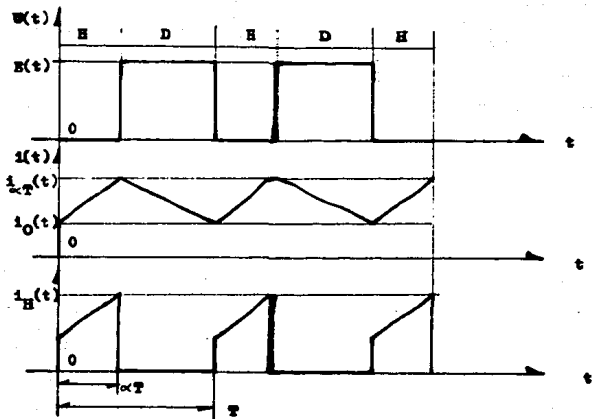


Fig. 2.1.d Forma de onda idealizada de la tensión  $U(t)$  igual a cero o  $E(t)$  según el estado de H o D.

- Durante el intervalo  $0 < t < T$ , el interruptor estático H está cerrado, el diodo D está abierto.

Siendo  $i_0(t)$  la corriente al principio de este intervalo. Durante el mismo,  $i(t)$  crece hasta alcanzar el valor  $i_T(t)$ .

- Durante el intervalo  $T < t < T$ , el diodo D conduce, H está abierto la corriente  $i(t)$  decrece, y tiene el mismo valor al final del período que al principio.

## 2.1.2. DIAGRAMA UTILIZADO EN TRACCION

El diagrama del principio del alimentador de corriente "Chopper" para reducir la tensión, permitiendo el arranque sin pérdidas de un motor serie, está representada en la fig. 2.2.

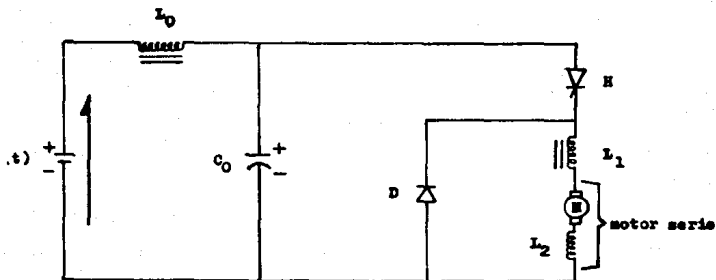


Fig. 2.2 Esquema del principio del alimentador de corriente para reducir la tensión. (Diagrama utilizado en tracción).

La reactancia inductiva (reactor saturado) de alizamiento  $L_1$  y el diodo de vía libre  $D$  aseguran la continuidad de corriente sobre el motor; una parte de la energía almacenada por el reactor saturable se recupera con el bloqueo del interruptor estático  $H$ . Un filtro, formado por una autointerinductancia  $L_0$  y un condensador  $C_0$ , está entre la fuente y el "alimentador de corriente", de forma que se aliza la corriente de línea, y reduce la ondulación de la ten--

sión de la línea, y la tensión a la entrada del "alimentador de corriente".

Para los circuitos auxiliares (circuitos anexos o -- circuitos de extinción) alimentados con baja tensión, el interruptor estático H lo hace por medio de transistores, pero al momento adecuado, la alimentación al circuito de potencia no puede realizarse sin los tiristores. Los circuitos anexos o circuitos de extinción (ver fig. 2.3) son necesarios para provocar la extinción y el disparo del tiristor de tracción Th1.

Numerosas variables aparecen para la asignación de los circuitos anexos o circuitos de extinción, pero el principio es siempre utilizar la descarga de un condensador para apagar el tiristor Th1.

Cuando se desea regular el tiempo de conducción del tiristor Th1, la descarga del condensador está obligada a dispararse por el encendido de un tiristor auxiliar Th2. La disposición que utilizamos para sus circuitos anexos o circuitos de extinción son como los de la fig. 2.3.

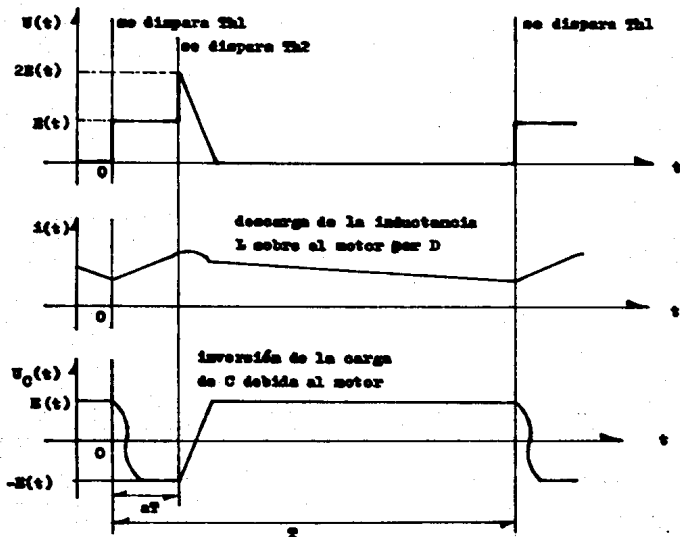
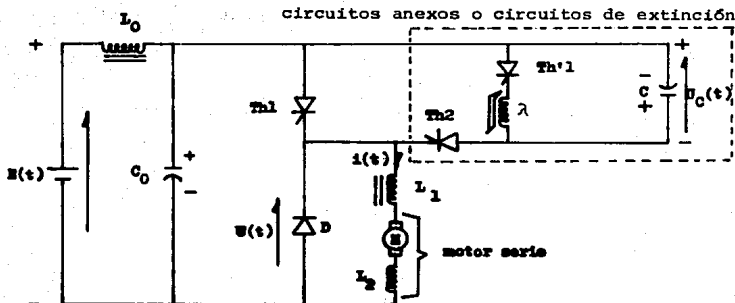


Fig. 2.3. Esquema de los circuitos anexos que se utilizan para provocar el disparo de los tiristores.

Si en el instante  $t = a T$ , el condensador C está cargado con las polaridades representadas en el esquema, y si se desbloquea el tiristor auxiliar Th2, el tiristor principal Th1 se apaga, la corriente  $i(t)$  del motor se reafirma a través de Th2, y  $\lambda$  (inductancia saturable) provoca la inversión de la carga del condensador C. Realizada esta inversión, la corriente del motor circula a través del diodo de vía libre D, hasta que de nuevo se enciende el tiristor principal Th1, en el instante  $t=T$ . En ese momento la corriente del rotor es de nuevo alimentado por la fuente a través de Th1. Entonces al energizar el tiristor de inversión Th'1, el condensador C oscila con la inductancia  $\lambda$  a través de un medio período, la corriente oscilatoria que atraviesa al tiristor principal Th1 pasa por cero y la oscilación se detiene.

La carga del condensador C está así inversa de nuevo y el condensador está preparado para una nueva extinción de Th1.

El encendido del tiristor de inversión Th'1 puede efectuarse sólo simultáneamente, si el tiristor principal Th1 lo hace anteriormente, El esquema de la fig. 2.3 para la tensión  $U_C(t)$  del condensador C de extinción corresponde al caso de un encendido simultáneo del tiristor principal Th1 y el tiristor de extinción Th2.



### 2.1.3. DIAGRAMA UTILIZADO EN FRENADO

El alimentador de corriente elevador de tensión, permite la regulación del frenado, ya sea recuperándose sobre la línea (llamado también frenado regenerativo) o cargándose sobre una resistencia fija (llamado frenado reostático o frenado dinámico). El diagrama que se usa para el frenado, emplea los mismos elementos que el alimentador de corriente en tracción, ver fig. 2.2. Estos elementos han sido renovados en la generatriz y el circuito receptor para las conmutaciones estáticas, ver fig. 2.4 y 2.5.

En electrónica de potencia, los semiconductores modifican de forma periódica la configuración de un circuito, comportándose como interruptores que abren o cierran según una secuencia determinada.

A menudo se les pide que se abran cuando son atravesados por una corriente, dicho de otra manera se les pide efectuar conmutaciones de corriente o sea transferir la misma corriente de una rama a otra.

La fuente está formada por el motor de tracción previamente conmutado en generatriz, en serie con la autoinductancia  $L_1$ . Las bobinas de excitación  $L_2$  (inductor) de esta generatriz pueden ser conectados a excitación serie o en -

derivación con excitación separada. El tiristor principal  $Th1$ , alimenta sus circuitos de extinción como se muestra en la fig. 2.3.

El circuito receptor está constituido por la línea de alimentación formada por un filtro  $L_0$  y  $C_0$  como en tracción. El diodo de vía libre  $D$  impide la descarga del condensador  $C_0$ , a través del tiristor principal  $Th1$ , cuando éste está energizado como se muestra en la fig. 2.4.

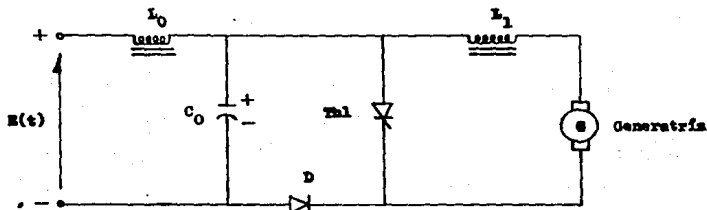


Fig. 2.4. Esquema del circuito receptor

El circuito receptor puede tener como carga un reostato de frenado  $R$  como se muestra en la fig. 2.5, esto es frenado reostático (frenado dinámico).

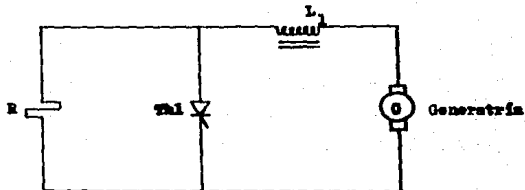


Fig. 2.5. Esquema del circuito receptor con un reostato de frenado.

La conmutación estática para el frenado de tracción puede ser realizada como se muestra en el diagrama de la fig. 2.6.

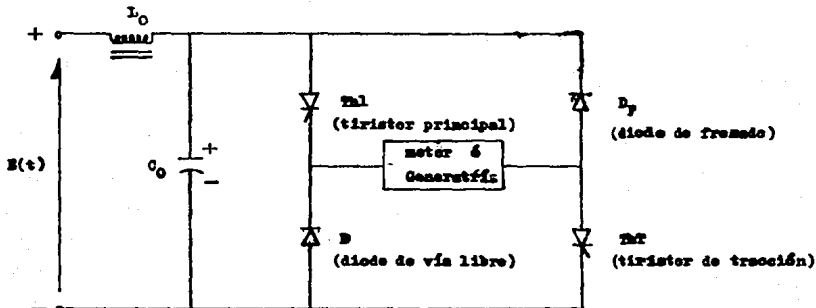


Fig. 2.6. Esquema del circuito receptor para la conmutación estática de tracción-frenado.

El tiristor de tracción ThT está constantemente conduciendo en tracción (motor) y constantemente bloqueado en frenado (generatriz).

## 2.2. EQUIPO DE TRACCION Y FRENADO DE AUTOMOTRICES A CORRIENTE CONTINUA

### 2.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL ALIMENTADOR DE CORRIENTE

El Chopper como ya se dijo antes en su definición - en el punto 2.1, es un alimentador que actúa en corrien-

te continua como un transformador de relación variable, - por lo que asegura con rendimiento adecuado, pero sin aislamiento galvánico, la reducción o elevación de la tensión y por consiguiente, la transformación inversa de la corriente; se utilizan dos configuraciones que son: Montaje serie y Montaje paralelo.

### 2.2.1.1 MONTAJE SERIE

De la fig. 2.7, se inserta un interruptor estático H en serie entre una fuente de tensión  $U_L(t)$ , la red de alimentación, y un circuito de carga, que es el motor de tracción.

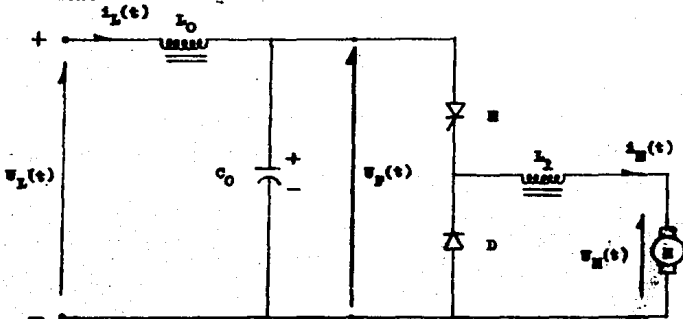


Fig. 2.7. Esquema de principio del alimentador de corriente (CHOPPER) utilizado en montaje serie. (montaje utilizado en tracción).

La inductancia de alizamiento  $L_1$  y el diodo de vía libre D aseguran la continuidad de corriente en el motor.

El filtro de línea constituido por la inductancia  $L_0$  y el condensador  $C_0$  producen un efecto de filtrado y reducen la ondulación de corriente de línea  $i_L(t)$  así como la ondulación de la tensión  $U_F(t)$  a la entrada del alimentador de corriente. Al aumentar la frecuencia se reduce la ondulación de la corriente suministrada a la carga y se hace más fácil el filtrado de la corriente tomada de la fuente  $U_L(t)$ .

Si el interruptor estático H se cierra durante un tiempo  $\alpha T$ , siendo T el período de funcionamiento del sistema y  $\alpha$  la relación de conducción cíclica, de esta manera se deducen las relaciones siguientes:

$$U_M(t) = \alpha U_L(t) \quad (\text{é}) \quad i_M(t) = \frac{1}{\alpha} i_L(t)$$

Al variar  $\alpha$  de 0 a 1 la tensión media  $U_M(t)$  del motor va de cero a  $U_L(t)$ .  $U_M(t)$  e  $i_M(t)$  son tensión y corriente media aplicada al motor.

### 2.2.1.2 MONTAJE PARALELO

El interruptor estático H está en paralelo a los bornes de la fuente de tensión que, en este caso, es el motor previamente conmutado en una generatriz y la fuente de ten

sión  $U_L(t)$ , como se muestra en la fig. 2.8.

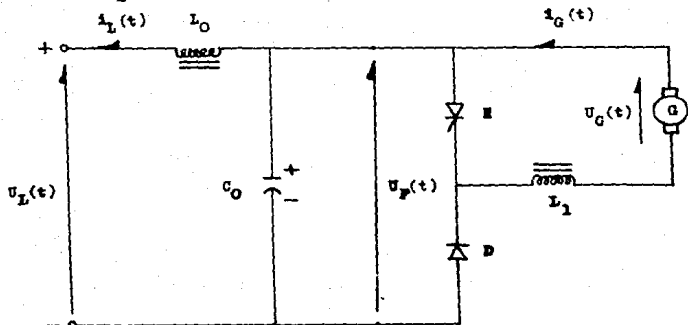


Fig. 2.8. Esquema de principio del alimentador de corriente (CHOPPER) utilizado en montaje paralelo. (montaje utilizado en frenado).

Los distintos elementos que constituyen el alimentador de corriente y el filtro de entrada o de línea, desempeñan la misma función que en el caso de un montaje serie. El motor en este caso funciona como una generatriz dando corriente a la fuente que la alimentaba mientras funcionaba como motor. Por ello se dice que el "CHOPPER" está colocado entre dos fuentes.

Si el interruptor estático H se cierra durante un tiempo  $T$ , con el período  $T$  de funcionamiento del sistema, y la relación de conducción cíclica; de esta manera se deducen las relaciones siguientes:

$$U_G(t) = (1 - \alpha) U_L(t) \quad \& \quad i_G(t) = \frac{1}{1 - \alpha} i_L(t)$$

$U_G(t)$  e  $i_G(t)$  son tensión y corriente media de la generatriz aplicada a la fuente  $U_L(t)$  que la alimentaba.

2.3. ALIMENTADOR DE CORRIENTE: A FRECUENCIAS SUBMÚLTIPLES Y PARAMETRADAS. UTILIZADO EN EL METRO DE LA CIUDAD DE MEXICO.

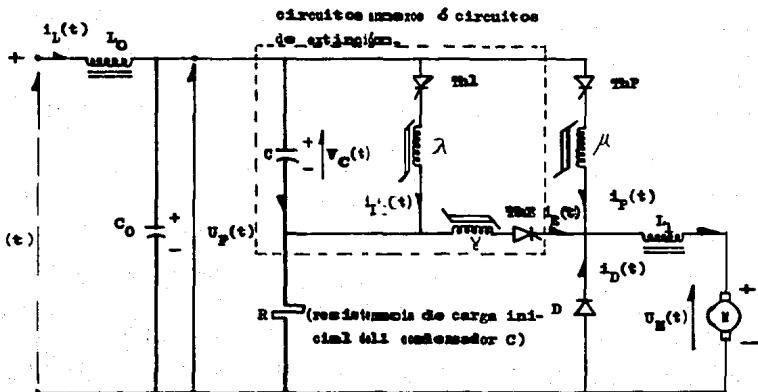


Fig. 2.9. Esquema de principio de un alimentador de corriente elemental de frecuencias sub-múltiples y parametradas.

El interruptor estático  $N$  está relacionado por medio de un tiristor de potencia  $ThP$ . Los circuitos anexo son necesarios para provocar la extinción del tiristor principal  $ThP$ , donde el principio se basa en la polarización inversa del tiristor  $ThP$  por la carga almacenada del condensador  $C$ .

Si nosotros deseamos modular los tiempos de conducción del  $ThP$ , es necesario provocar la descarga del condensador por medio del encendido de un tiristor auxiliar, llamado tiristor de extinción  $ThE$ . La configuración anterior permite la inversión de la carga inicial almacenada en el condensador  $C$  mediante un circuito auxiliar (circuitos anexos o circuitos de extinción), constituido de un tiristor de inversión  $ThI$  y un tiristor de extinción  $ThE$ .

Se establece entonces que la conducción de los tiristores auxiliares  $ThI$  y  $ThE$  no puede ser simultánea; como se muestra en la fig. 2.9.

Así existe luego un tiempo de conducción mínima del tiristor principal  $ThP$ , que es función de los tiempos de inversión de la carga inicial del condensador  $C$ . El tiristor principal utilizado es del tipo rápido. Se caracteriza por un tiempo de recuperación  $t_q$  por conmutación relativamente reducido del orden de 40  $\mu s$ . Esa característica permite dar como resultado esencial reducir el valor del condensador  $C$  y el tiempo de conducción mínima del alimentador de corriente (CHOPPER).

### 2.3.1 EL FILTRO DE ENTRADA

La máxima frecuencia de resonancia del filtro de entrada es de:



$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} = 41 \text{ Hz}$$

Ese valor es inferior al de la frecuencia utilizada para los sistemas de señalización, que es de 60 Hz.

La frecuencia nominal de funcionamiento de un Chopper elemental es de 360 Hz. Ese valor no resulta en pérdidas considerables por conmutación ni exige la utilización de las inductancias de alisamiento voluminosas.

El tiempo de conducción mínima a  $f = 360$  Hz impone una corriente de arranque demasiado grande. La solución adoptada consiste en utilizar frecuencias submúltiples:

$$\frac{f}{4} = 90 \text{ Hz}, \quad \frac{f}{3} = 120 \text{ Hz}, \quad \frac{f}{2} = 180 \text{ Hz}, \quad \frac{f}{1.5} = 240 \text{ Hz}$$

La frecuencia mínima de funcionamiento del alimentador de corriente, considerada en la línea, es de 90 Hz  $\times 3 = 270$  Hz. Es decir 3 veces superior a la frecuencia máxima de resonancia del filtro de entrada.

### 2.3.2 ESQUEMA DEL ALIMENTADOR DE CORRIENTE TRIFÁSICO UTILIZADO

Con relación a la máxima intensidad de arranque por motor de tracción y a los tiristores rápidos disponibles, se utilizan tres Choppers elementales asociados en paralelo.

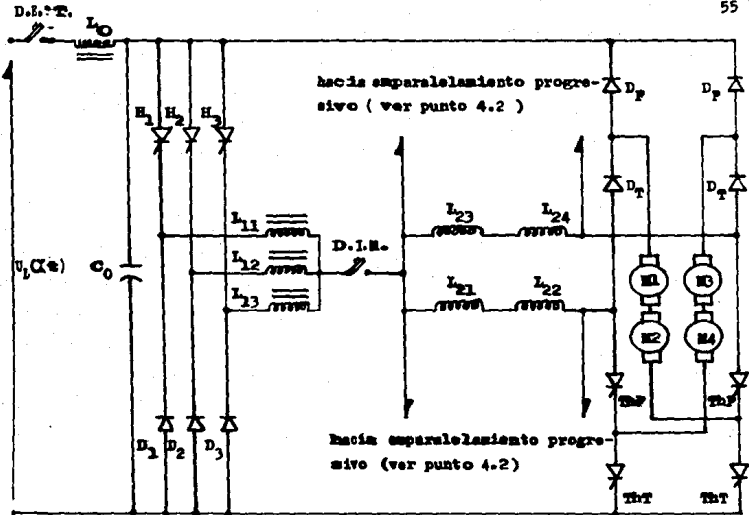


Fig. 2.10 Esquema del principio de tracción del Alimentador de Corriente " CHOPPER "

$L_{11}$ ,  $L_{12}$ ,  $L_{23}$ ,  $L_{24}$ , son las inductancias ( inductores ) que representan respectivamente los polos principales de excitación seria de los motores M1, M2, M3, M4.

Los diodos de frenado y tracción  $D_F$  y  $D_T$  y los tiristores  $ThT$  y  $ThF$  constituyen la conmutación estática tracción - frenado definidos en el punto 4.3.1a ( Capitulo 4 ).

A fin de reducir la ondulación de la corriente en los

motores así como la ondulación de la tensión y de la corriente en la línea, defasamos en un tercio de período ( $2/3$ ), los instantes de encendido de los tiristores principales o interruptores estáticos ( $H_1, H_2$  y  $H_3$ ).

Llamamos una fase a cada Chopper elemental, así, el equipo de tracción del metro de México constituye un Chopper de corriente trifásica.

Aseguramos la protección de los semiconductores de potencia contra las intensidades por medio de dos disyuntores de tipo ultrarápido, cuyo tiempo de intervención mecánica es del orden de 2.5 ms. El primer disyuntor, D.E.T., está dispuesto a la cabeza del circuito; el segundo disyuntor, D.I.M. protege el contacto cerrado por el circuito de frenaje.

#### 2.4 ELEMENTOS QUE INTEGRAN O FORMAN EL CIRCUITO DE POTENCIA

El circuito de potencia está compuesto básicamente por:

- Filtro de línea
- Motores de tracción.
- Reactores de alizamiento.
- El Chopper
- Fusibles, interruptores de protección, conmutadores y elementos de medición.

#### 2.4.1 FILTRO DE LINEA Lo Y Co.

Durante la operación del alimentador de corriente -- (Chopper), se generan corrientes con forma de onda rectangular, las cuales poseen una gran cantidad de armónicas -- que pueden causar interferencia en las señales que fluyen a través de la línea de alimentación. El filtro de línea atenúa las perturbaciones sobre la línea, suministra -- energía al circuito de potencia, protege al circuito de -- potencia contra variaciones bruscas de la corriente y de -- la tensión y limita corrientes de falla.

La inductancia  $L_0$  del filtro será directamente montada y no deberá transmitir vibraciones al bastidor, autoinductancia sin circuitos magnéticos, protegido contra cuerpos extraños mediante una envoltura integrada en su construcción, arrollamiento de banda de aluminio, de eje vertical, enfriamiento natural al aire y aislamiento clase F 5 H.

La capacidad total que se requiere para el funcionamiento del condensador, corresponde a 3 mH. La autoinductancia va insertada entre dos placas de acero.

El condensador  $C_0$  del filtro será constituido mediante un arreglo conveniente de condensadores en envases herméticos y montados de tal manera que permitan evitar los esfuerzos engendrados por los estados de temperatura, a que

están sometidos. La capacidad total que se requiere para la función "condensador de filtro" corresponde a 5mF, siendo obtenida al montar en paralelo 3 cajas unitarias de condensador cada una de las cuales proporciona una capacidad de 1,666mF.

Después del corte de corriente sobre la línea, el condensador de filtro debe poder descargar de 900 a 400 volts en menos de tres seg. considerando una carga de 10 Kw.

#### 2.4.2 MOTORES DE TRACCION

Los motores se encuentran conectados a las dos fases del Chopper a través de reactores de alizamiento, con lo cual se logra el equilibrio de corrientes en los "alimentadores de corriente". Los reactores o inductancias de alizamiento, asociados con los diodos de vía libre D aseguran la continuidad de corriente en los motores durante la fase de conducción del "Chopper".

Los motores de tracción serán de corriente continua, con excitación serie o con excitación independiente (excitación separada).

Actúan cada uno sobre las dos ruedas con neumático de un mismo eje por medio de un puente diferencial.

### 2.4.3 REACTORES DE ALIZAMIENTO

Los motores se encuentran conectados a las dos fases del "Chopper" a través de reactores de alizamiento o inductancias de alizamiento, con el cual se logra el equilibrio de corriente. Estas inductancias asociadas con los diodos de vía libre aseguran la continuidad de corriente en los motores durante la fase de conducción del "Chopper". También limitan la ondulación de la corriente de alimentación a los motores a menos de 10% y moderan las variaciones de corriente respecto al tiempo.

### 2.4.4 EL CHOPPER

Este equipo permite a partir de una fuente de corriente continua, alimentar una carga con tensión continua y regulable desde un valor cero hasta un voltaje nominal.

Cada fase del "Chopper" está constituido por:

- El tiristor principal o de marcha **ThP**.
- El tiristor de inversión **ThI**.
- El tiristor de paro o de extinción **ThR**.
- El diodo de vía libre **D**.

Cada uno de estos componentes está hecho de un conjunto de dos componentes montados en serie de manera a tener una buena seguridad en mantenimiento en tensión.

El equilibrio de los componentes en serie se asegu-

ra en funcionamiento estático por resistencia de equilibro y en funcionamiento dinámico por circuitos R-C de protección.

En serie con cada grupo tiristor, una inductancia  $(\lambda, \mu, \gamma)$  que permite controlar la velocidad de subida de la corriente en el tiristor.

Se encuentra también, asociado con cada fase:

- Una inductancia de alizamiento  $L_1$ .
- Un tiristor de frenado  $T_{BF}$ .
- Una resistencia de carga inicial del condensador  $R_{CI}$ .

En tracción el "Chopper" funciona como "CHOPPER SERIE", reductor de tensión.

En frenado el "Chopper" funciona como "CHOPPER DERIVACION", elevador de tensión.

Sea en funcionamiento receptor o en funcionamiento como generatriz los motores están siempre con excitación serie.

Cada fase comprende su circuito de extinción. Además de los tiristores de extinción y de inversión, ya mencionados, el circuito comprende un condensador de extinción C, inductancia de inversión y la resistencia de car

ga inicial del condensador.

#### 2.4.5 FUSIBLE, INTERRUPTORES DE PROTECCION, CONMUTADORES Y ELEMENTOS DE MEDICION

El circuito de potencia cuenta con diversos interruptores y fusibles de protección: fusibles de tracción, disyuntores del equipo de tracción y disyuntor de aislamiento motor, relevador diferencial de intensidad, relevador de - super intensidad, relevador de marcha con motores parados, relevador de comparación de corriente en los motores de un bogie a otro.

- CONMUTADORES TRACCION-FRENADO. Establece las conexiones correspondientes de los motores para la tracción y para el frenado. En frenado, la corriente de los inducidos - de los motores está en sentido inverso del que existe en tracción, mientras que la corriente en los inductores está siempre en el mismo sentido.

Los elementos de medición, miden los parámetros más importantes del circuito de potencia y son enviados a la lógica de control por medio de transformadores de tensión y transformadores de corriente.

#### 2.5 CARACTERISTICAS DEL ALIMENTADOR DE CORRIENTE (CHOPPER) PARA EL METRO DE LA CIUDAD DE MEXICO

El material MP-82 permite la formación de trenes de 6 a 9 carros, y comprende cuatro tipos de carros:



M: Motriz con cabina de conducción.

N: Motriz sin cabina de conducción.

R: Remolque.

PR: Remolque equipado con dispositivo de pilotaje -  
automático.

- Tren de 6 coches : M - R - N - N - PR - M

- Tren de 9 coches : M - R - N - N - PR - N - N - R -  
M (longitud del tren 147.62 m)

En estas formaciones de tren, todos los coches deben estar dispuestos, de modo que presenten su parte delantera hacia la parte delantera del tren, excepto la motriz de cola, que se dispone naturalmente en sentido inverso a la de los otros coches.

La parte delantera de los coches, se define por la posición de la escalera de emergencia que está instalada en la parte delantera.

#### 2.5.1 CARACTERISTICAS DE LOS CARROS

- Peso estático en vacío 225,850 Kg (de 9 carros)
- A 4/4 de carga 332,950 Kg (170 pasajeros x carro)
- A 5/4 de carga 360,040 Kg (213 pasajeros por carro)
- Capacidad de pasajeros 1,530 a 4/4 de carga.
- Peso de motriz con cabina "M" : 28,150 Kg
- Peso de motriz sin cabina "N" : 26,900 Kg
- Peso del remolque "R" : 20,650 Kg.
- Peso por pasajero 70 Kg.

- Potencia por carro : 4 motores X 128 KW. (potencia (continua) = 512 Kw.
- Potencia del tren : 6 motrices x 512 Kw. (por motriz)=3,072 Kw. continuos.
- Aceleración máxima:  $1.4 \text{ mt./s}^2$  (en tracción) } (con 4/4 de carga)  
 $1.33 \text{ mt./s}^2$  (en frenado) }
- Velocidad máxima : 80 Km./hr.
- Desaceleración máxima regular:  $1.8 \text{ mt./s}^2$  (con 3/4 de carga)
- Desaceleración máxima de emergencia:  $2.0 \text{ mt./s}^2$  con 4/4 de carga)
- No. de motores de tracción: 6 motrices x 4 motores por motriz = 24
- No. de Chopper/tren : (cada Chopper controla 4 motores de tracción)
- Tipos de frenado:
  - Frenado eléctrico (frenado reostático o frenado dinámico, frenado regenerativo o por recuperación de energía a la red).
  - Frenado mecánico (frenado neumático, que se lleva a cabo por medio de balatas.

#### 2.5.2 CARACTERISTICAS DE LOS MOTORES DE TRACCION

- Potencia (continua) : 128 Kw. ,360 V. ,395 A. ,2,000 r.p.m.
- Potencia por hora (Kw-hr): 138 Kw. ,360V. ,426 A. ,1,950 r.p.m.
- Velocidad máxima : 4054 r.p.m. 35% en el campo de operación.
- Tipo de motor: motor de C.D. campo serie o con excitación independiente.
- No. de polos : 4 polos.
- Tipo de ventilación : auto-ventilado.

- Tipo de aislamiento : clase "H"
- Línea de alimentación:

Voltaje : 750 V.C.C. nominales. (900 V. máx. 600 V. mín.).

### 2.5.3 CARACTERISTICAS DEL CHOPPER

- No. de fases : 3 fases.
- Frecuencia de operación : 219 Hz./ por fase
- Frecuencia total : 438 Hz.
- Voltaje constante de operación.
- Control automático de aceleración.
- Control automático de campo variable.
- Voltaje de operación : 750 V.C.D.
- Máxima aceleración de corriente: 659 A.
- Máxima desaceleración de corriente : 550 A.
- Enfriamiento : ventilación forzada. (aire, 50 mt<sup>3</sup>/min.)
- Potencia de tiristores : 2,500 V. 400 A.
- Potencia del diodo : 2,800 V. 800A.
- Tiristor principal : 2 en serie/fase
- Tiristor de extinción : 2 en serie/fase.
- Tiristor de inversión : 2 en serie/fase.

CAPITULO III  
PRUEBAS DE VACIO Y CON CARGA DEL SISTEMA DE CONTROL  
AUTOMATICO ("CHOPPER")

- 3.1. GENERALIDADES
- 3.2. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO
- 3.3. PRUEBAS DE BAJA FRECUENCIA
  - 3.3.1. PRUEBA LOCAL
  - 3.3.2. PRUEBA GENERAL
    - 3.3.2.1. PRUEBAS DE FABRICA
    - 3.3.2.2. PRUEBAS SOBRE VIA DE PRUEBAS (PRUEBA EN LOS TALLERES DE S.T.C. O EN LINEA SOBRE LA RED DEL METRO).

### 3.1. GENERALIDADES

Los equipos que integran el alimentador de corriente "Chopper" cuentan con un alto grado de confiabilidad para responder a las condiciones de explotación a que son sometidos los trenes y lograr que el nivel de mantenimiento sea lo más bajo posible. El grado de confiabilidad es fijado para cada equipo y para todo el conjunto de acuerdo con sus exigencias.

Los equipos son concebidos para dar servicio en la intemperie y dentro de un túnel, sin que estas condiciones de operación ocasionen ninguna perturbación en su funcionamiento, ni fatiga anormal de las piezas o componentes, ni aun su destrucción lenta.

### 3.2. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

El diseño del equipo permite la realización de pruebas a bajo nivel desde la cabina de conducción. Cuenta con la posibilidad de realizar pruebas locales para el control de tiristores sobre las motrices para facilitar el diagnóstico de fallas. Las protecciones necesarias para la realización de estas pruebas y las que el tren requiera, llamadas prueba general.

Todos los dispositivos necesarios para medir corrien-

tes de línea en tracción y frenado, potencia enviada o solici-  
tud de la línea, tensión de línea, corriente en cada rama  
de los motores, tensión en los bornes de cada uno de los --  
grupos de motores y todos los parámetros importantes, tie-  
nen una precisión de  $\pm 1\%$  y las señales son llevadas a una  
toma múltiple situada en el tabique de cabina y frente de  
lantera de carro.

Todas las señales necesarias para verificar el buen -  
funcionamiento de la lógica están situadas al frente del --  
gabinete de la misma mediante puntos de pruebas o indicado-  
res de funcionamiento.

Para su fácil revisión, los semiconductores de poten-  
cia tienen una señalización luminosa indicadora de su esta-  
do o puntos exteriores de la prueba.

El "Chopper" puede ser controlado por el pilotaje au-  
tomático o por el manipulador, así como por las marchas de-  
gradadas existentes, entre ellas, no existe interconexión -  
de una marcha sobre otra. El funcionamiento de "Chopper" no  
está condicionado al buen estado del pilotaje automático o -  
de cualquiera de las marchas degradadas.

Los controles manuales de tracción y de frenado se --  
han con un solo manipulador de tipo rotativo. La posición

neutra está en la parte media de su desplazamiento. Las órdenes de tracción las da el conductor moviendo la palanca hacia adelante y las de frenado hacia atrás. El manipulador tiene cinco posiciones identificables:

- Frenado de urgencia. ( F.U. )
- Frenado de servicio máximo.
- Neutro.
- Maniobra.
- Tracción máxima.

El paso del manipulador por cualquiera de estos puntos debe ser apreciablemente sentido por el operador.

Además estas posiciones se señalan en el cuadrante de los pasos intermedios entre el frenado de servicio máximo y neutro y también entre tracción máxima y maniobra, equivalente a las posiciones del manipulador de los trenes actualmente en servicio, sin que el paso del manipulador por estos puntos sea sentido por el operador.

Tanto en frenado como en tracción, el esfuerzo solicitado debe ser proporcional a la posición del manipulador en relación al neutro.

Las órdenes de conducción regulan el suministro de una fuente de corriente estable y su salida constituye el mando continuo. Esta acción está concebida mediante circui

tos montados en seguridad, de tal forma que si ocurre una falla en cualquiera de sus componentes en un paso de tracción, resulta una disminución del esfuerzo de tracción o si ocurre en frenado se aumenta el esfuerzo de frenado.

Cualquier falla susceptible de ser detectada por el "Chopper" es eliminada, o aislada por acción directa sobre el porcentaje de conducción hasta la extinción completa si es requerida. Las fallas que el Chopper mismo no pueda detectar, son aisladas por el disparo de los disyuntores ultrarápidos.

En todo caso, el nivel de protección contra los defectos son asegurados por los circuitos electrónicos, actuando, ya sea por el "Chopper", o bien sobre los disyuntores.

### 3.3. PRUEBAS DE BAJA FRECUENCIA

El equipo de tracción y frenado permite la realización de pruebas de vacío y con carga llamadas también pruebas de baja frecuencia.

Estas pruebas se realizan bajo alta tensión y consisten en un control en parada de los circuitos de potencia y de la lógica.

Se efectúa la comprobación haciendo funcionar el --



"Chopper" con muy baja frecuencia (5Hz) y conducción mínima, lo que permite hacer circular una corriente de 35 A aproximadamente en cada bogie.

### 3.3.1. PRUEBA LOCAL

Se realiza a partir del gabinete de la lógica y en una sola automotriz; éstas se realizan sin someter a tensión el circuito de potencia. Estas pruebas sirven para verificar - las principales funciones de la lógica, simulando las señales de entrada y observando las de salida. Se puede simular entre otras funciones el control continuo, las frecuencias de funcionamiento, las protecciones por circuitos electrónicos.

También se realizan pruebas locales, con tensión y sirven para verificar el estado de funcionamiento de semiconductores de potencia, puenteo de campo, conmutación tracción-frenado, disyuntores, etc. Estas pruebas requieren que el tren no se mueva durante su realización.

- Señalizaciones locales.

Existen en puntos visibles del gabinete de la lógica, - señales indicadores de: motriz inactiva, carro bloqueado, defecto de tracción, defecto de frenado, sobretensión de línea, sobrecorriente de fase del "Chopper", sobrecorriente del motor, sobretensión en los bornes de los motores, fallas del -

conmutador tracción-frenado, sistema de enfriamiento defectuoso.

- Señalización de cabina.

La cabina contiene señalizaciones de motriz inactiva a la tracción y el frenado, por lo que también están contempladas estas alimentaciones.

- Fusibles de escobillas.

Los fusibles de escobillas están localizados en los bogies de los carros-remolques, estos son de una capacidad de 800 A y cumple con los siguientes requerimientos: fusión silenciosa sin huella exterior, perfectamente recuperables, velocidad de fusión adecuada.

- Conmutador de "Escobillas-Trole".

Para hacer posible la alimentación de alta tensión en vías desprovistas de barras de guiado o en el taller; el conmutador "Escobillas-Trole" permiten la alimentación de los circuitos de potencia por medio de escobillas o por medio de una toma de taller limitada por un trole suspendido de una línea aérea.

El accionamiento de este conmutador se hace indistintamente de uno o del otro lado del coche.

### 3.3.2 PRUEBA GENERAL

Esta prueba permite controlar el buen funcionamiento de los equipos de tracción-frenado del tren completo a partir de la cabina en servicio. Esta prueba se realiza únicamente a las automotrices alimentadas con alta tensión.

Las pruebas de los equipos de tracción-frenado se dividen en dos partes y son:

- 1.- Pruebas en fábrica.
- 2.- Pruebas sobre vía de pruebas. (prueba en los talleres de S.T.C. o en líneas sobre la red del metro).

Las pruebas en fábrica o sobre vía de pruebas son de dos categorías:

- Las pruebas en serie.
- Las pruebas de tipo.

a).- Las pruebas de serie se efectúan y repiten sobre cada uno de los equipos o piezas de los equipos.

b).- Las pruebas de tipo se realizan sobre una cantidad acordada respecto a cada aparato o conjunto.

#### 3.3.2.1 PRUEBAS DE FABRICA

- 1.- Los motores de tracción-frenado se deben ajustar a las normas de su construcción por lo que se les hace las -

siguientes pruebas:

a).- Pruebas tipo sobre el 1½ de la producción:

- Medida de la resistencia en frío de los diferentes circuitos.
- Prueba de la puesta a las vibraciones y a los choques.
- Levantamiento de la curva de magnetización.
- Medida y separación de las pérdidas en vacío.
- Prueba de calentamiento en marcha continua, tomando en cuenta la ondulación de la corriente.
- Prueba de conmutación.
- Levantamiento de la característica (velocidad en función de la intensidad) de carga en caliente - para 720 volts.
- Prueba de sobre velocidad.
- Prueba de arranque.
- Pruebas de corte y restablecimiento de la tensión de alimentación.
- Pruebas de rigidez dieléctrica.
- Medida del gasto de aire de ventilación.
- Medida de ruido.

b).- Pruebas Serie:

- Medida de la resistencia en frío de los diferentes devanados.
- Prueba de calentamiento uni-horario.
- Prueba de conmutación.

- Registro de la característica de carga en caliente bajo 720 volts.
- Prueba de sobrevelocidad.
- Prueba de rigidez dieléctrica en caliente.
- Los incrementos de temperatura constatados no deben ser superiores a los límites admitidos para los aislamientos utilizados.

La característica de carga no debe diferir de  $\pm 3\%$  a pleno campo y de  $\pm 4\%$  a campo reducido de la característica levantada sobre el motor para las intensidades de prueba comprendidas entre 0.8 y 1.1 de la intensidad de prueba de calentamiento uni-horario.

## 2.- Pruebas de los bloques de semiconductores

- a).- Pruebas tipo sobre el 3% de la producción
- Prueba de continuidad de los circuitos.
  - Prueba de rigidez dieléctrica.
  - Medida del gasto de aire de enfriamiento.
  - Verificación de las características con carga.
  - Medida de la temperatura de funcionamiento de sus componentes.
  - Verificación del equilibrio de las corrientes y de las tensiones.
  - Registro de forma de corriente y de tensión.
  - Prueba de envejecimiento (en elementos).
  - Medida del ruido.

Las pruebas de los blocks de semiconductores necesitan el montaje de un banco de prueba completo que incluya todos los equipos de tracción de una motriz. Este banco servirá para verificar igualmente el buen funcionamiento del tablero de la lógica.

b).- Pruebas serie:

- Prueba de continuidad de los circuitos.
- Prueba de rigidez dieléctrica.
- Verificación de las características con carga.
- Verificación del equilibrio de las corrientes y de las tensiones.
- Registro de las formas de corriente y de la tensión.

3.- Prueba de inductancias de alta tensión.

Las pruebas de las inductancias de alta tensión se harán de acuerdo a las normas establecidas, ejecutándose las siguientes pruebas:

a).- Pruebas de tipo

- Pruebas de rigidez dieléctrica.
- Medida de la resistencia en frío y en caliente.
- Medida de la inductancia para el valor nominal de la corriente.
- Medida de la resistencia de aislamiento.
- Prueba de calentamiento.

- Medida del ruido de la corriente nominal y de las frecuencias de funcionamiento.
- b).- Pruebas serie
  - Pruebas de rigidez dieléctrica.
  - Medida de la resistencia en frío.
  - Medida de la inductancia para el valor nominal de la corriente.
  - Medida de la resistencia de aislamiento.
- 4.- Prueba de los condensadores de alta tensión.
  - a).- Pruebas de tipo sobre el 1% de cada tipo:
    - Prueba de rigidez dieléctrica.
    - Medida de la capacidad.
    - Pruebas de calentamiento.
  - b).- Pruebas de serie:
    - Pruebas de rigidez dieléctrica.
    - Medida de la capacidad.
- 5.- Pruebas de los equipos de corte y conmutación o aislamiento.

Las pruebas de los equipos de corte, de conmutación o de aislamiento, se harán de acuerdo a las normas establecidas y en particular se harán las siguientes pruebas:

- a).- Pruebas de tipo sobre el 1% de cada tipo:
  - Verificación del funcionamiento mecánico.

- Prueba de robustez mecánica.
- Prueba de comportamiento a las vibraciones y a los choques.
- Prueba de hermeticidad de los equipos neumáticos.
- Medidas de las resistencias e impedancias.
- Prueba de calentamiento.
- Prueba de corte y de cierre.
- Levantamiento de la característica temperatura/corriente.
- Pruebas de rigidez dieléctrica.

b).- Pruebas de serie:

- Verificación del funcionamiento mecánico.
- Prueba de hermeticidad de los equipos neumáticos.
- Medida de las resistencias e impedancias.
- Prueba de rigidez dieléctrica.

6.- Pruebas de los materiales electrónicos.

a).- Pruebas de tipo sobre el 1% de producción:

- Prueba de comportamiento a las vibraciones y a los choques.
- Prueba de rigidez dieléctrica.
- Verificación del funcionamiento normal a las condiciones específicas.
- Registro de forma de onda.



b).- Pruebas de serie:

- Pruebas de rigidez dieléctrica.
- Verificación del funcionamiento normal a las condiciones específicas.
- Registro de las formas de onda.

7.- Pruebas de relevadores.

a).- Pruebas de tipo sobre el 1% de la producción de cada tipo.

- Verificación del ajuste y del funcionamiento.
- Prueba de rigidez dieléctrica.
- Prueba de comportamiento a las vibraciones y a los choques.
- Prueba de robustez mecánica.

b).- Pruebas de serie:

- Verificación del ajuste y del funcionamiento.
- Prueba de rigidez dieléctrica.

8.- Pruebas del manipulador.

a).- Pruebas de tipo sobre el 3% de la producción:

- Prueba de robustez mecánica.
- Prueba de comportamiento a las vibraciones y a los choques.
- Prueba de rigidez dieléctrica.
- Verificación del buen funcionamiento.

b).- Pruebas de serie:

- Pruebas de rigidez dieléctrica.
- Verificación del buen funcionamiento.

3.3.2.2 PRUEBAS SOBRE VIA DE PRUEBAS (PRUEBA EN LOS TALLERES DE S.T.C. O EN LINEA SOBRE LA RED DEL METRO)

Esta prueba sirve para ajustar y verificar su correcta operación de todo el tren en la red del sistema.

a).- Pruebas tipo sobre un tren:

- Prueba en vacío de los tableros de lógica.
- Verificación del control continuo.
- Verificación del sentido de rotación de los motores.
- Verificación del frenado mecánico en todos los trenes.
- Prueba bajo la tensión de cada una de las motrices desde los controles del tablero de lógica.
- Prueba de comportamiento bajo tensión del tren.
- Prueba de tracción en vacío.
- Prueba de frenado por recuperación en vacío.
- Prueba de recuperación de la carga en frenado por recuperación.
- Prueba de frenado por recuperación sobre una línea no receptiva.
- Medida de las perturbaciones sobre los puestos -

de rectificación y la señalización.

- Prueba de tracción y frenado por recuperación - con 3/4 y 4/4 de carga.
- Verificación del calentamiento de los motores y de diversas componentes de los equipos de tracción con 4/4 de carga.

b).- Pruebas de serie:

- Prueba en vacío de los tableros de lógica.
- Verificación del control continuo.
- Verificación del sentido de rotación de los motores.
- Verificación del frenado mecánico para todos los engranes.
- Prueba bajo tensión de cada una de las motrices desde los mandos del tablero de lógica.
- Prueba de comportamiento con tensión del tren.
- Prueba de tracción en vacío.
- Prueba en frenado por recuperación en vacío.
- Prueba de interrupción de la carga en frenado por recuperación.

El primer tren debe pasar las pruebas de medida de -- las perturbaciones sobre los puestos de rectificación y la señalización. Después de realizadas estas pruebas el tren saldrá a la línea para circular 7 días en vacío y 8 días -- con pasajeros; durante este período se observan todas las

condiciones del funcionamiento del tren.

Cuando el tren ya está en funcionamiento de operación normal, todos los equipos contenidos en el sistema deben -- cumplir recorridos mínimos de 8,000 Km sin requerir ninguna intervención. Las fallas de la electrónica de control - o de los dispositivos de baja tensión deben repararse en un máximo de 1/4 de hora y la relativa a circuitos de potencia en un máximo de 2 horas.

CAPITULO IV  
ANALISIS DE LA OPERACION

- 4.1. CARACTERISTICAS GENERALES DEL ALIMENTADOR DE CORRIENTE A FRECUENCIAS SUBMÚLTIPLES Y PARAMETRADAS
  - 4.1.1 ESTUDIO CRONOLÓGICO DEL FUNCIONAMIENTO
  - 4.1.2 CAMBIO DE TENSIONES Y CORRIENTES DE SEMICONDUCTORES (PARA EL ALIMENTADOR DE CORRIENTE A FRECUENCIAS SUBMÚLTIPLES Y PARAMETRADAS)
  - 4.1.3 SELECCION DE SEMICONDUCTORES
    - 4.1.3.1 TIRISTOR PRINCIPAL  $ThP$
    - 4.1.3.2 TIRISTOR DE INVERSION  $ThI$
    - 4.1.3.3 TIRISTOR DE EXTINCIÓN  $ThE$
    - 4.1.3.4 DIODO DE VIA LIBRE  $D$
  - 4.2 PRINCIPIO DE EMPARALELAMIENTO PROGRESIVO DEL INDUCTOR
    - 4.2.1 EMPARALELAMIENTO PROGRESIVO POR TRANSISTORES (ASOCIADOS A UN ESQUEMA TRIFÁSICO)
- 4.3 FRENADO ELECTRICO DE AUTOMOTRICES URBANAS
  - 4.3.1 FRENADO POR RECUPERACION DE ENERGIA A LA RED (FRENADO REGENERATIVO)
  - 4.3.2 FRENADO REOSTATICO (FRENADO DINAMICO)
    - 4.3.2.1 PREDETERMINACION DEL REOSTATO DE FRENADO " $R_h$ "
    - 4.3.2.2 VENTAJAS DEL CONTROL DE EMPARALELAMIENTO PROGRESIVO
    - 4.3.2.3 TRANSICION DEL FRENADO ELECTRICO POR RECUPERACION A FRENADO REOSTATICO
    - 4.3.2.4 PROBLEMAS EN LA COLOCACION DE LA GENERATRIZ DE EXCITACION SERIE

4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ALIMENTADOR DE CORRIENTE  
A FRECUENCIAS SUBMÚLTIPLES Y PARAMETRADAS.

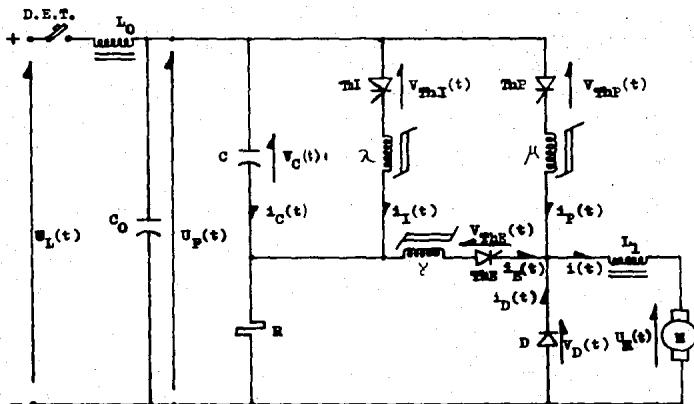


Fig. 4.1 Esquema del Alimentador de Corriente a frecuencias submúltiples y parametradas utilizado.

Los elementos que constituyen el filtro de entrada y el alimentador de corriente son:

ThP	Tiristor principal o de marcha
ThE	Tiristor de extinción o de paro
ThI	Tiristor de inversión
D	Diodo de vfa libre
L <sub>0</sub>	Inductancia del filtro de 3mH
Co	Condensador del filtro de 5mF
L <sub>1</sub>	Inductancias de alizamiento
C	Condensador de extinción del tiristor principal
$\mu$	Inductancia saturable que limita la velocidad inicial de crecimiento de corriente en el tiristor principal
$\gamma$	Inductancia saturable que limita la velocidad inicial de crecimiento de corriente en el tiristor de extinción o de paro
$\lambda$	Inductancia saturable de inversión de la carga del condensador C
R	Resistencia de carga inicial del condensador C

#### - HIPOTESIS DE CALCULO

La dimensión correcta del filtro de entrada nos permite describir que  $U_P(t) \cong U_L(t) = \text{cte.}$  durante el período de funcionamiento del alimentador de corriente; por lo tanto se identifica  $U_P(t)$  como  $U_L(t)$ .

El motor de tracción a excitación serie, tiene un empaque raleamiento resistivo con el inductor. La constante de tiempo del circuito inductor varía de 10ms a 67ms, por lo tanto se deduce que la f.c.e.m. ( $U_M(t)$ ) desarrollada por el motor es constante durante un período de funcionamiento --

del alimentador de corriente.

Los tiempos de conmutación entre los semiconductores son muy cortos con relación a la constante de tiempo del circuito receptor fig. 4.3. Durante el estudio del régimen transitorio, consideramos que la corriente  $i(t)$  del motor es constante. No tomando en cuenta las inductancias  $\mu$ ,  $\gamma$  y  $\delta$ ; se obtienen valores en estado saturado.

Los problemas de aplicación implican para los tiristores: principal, de extinción y de inversión (ThP, ThE, -ThI) la consideración de sus características de funcionamiento, mencionadas en el punto 1.1.2 (capítulo I); y — que se refiere a la consideración de tres estados:

1.- Estado de bloqueo: La intensidad de corriente directa es cero, el tiristor es capaz de soportar una tensión directa positiva.

2.- Estado de conducción: La tensión a los bornes del tiristor es cero, una corriente directa circula por el semiconductor.

3.- Estado de apagado: La intensidad de corriente directa es cero, pero la tensión entre el ánodo y el cátodo no es cero, ni negativo.



## 4.1.1 ESTUDIO CRONOLÓGICO DEL FUNCIONAMIENTO

Dentro del modo de pilotaje, los impulsos de control de los tiristores principal  $ThP$  y de inversión  $ThI$  son sincronizados. Por lo tanto se considera cada instante como el origen del período de funcionamiento del alimentador. Si el circuito receptor fig. 4.3. funciona como diodo de vía libre las condiciones iniciales son:

$$v_D(t) = 0 \quad ; \quad I_D(t) = (i_I)_{t_0}$$

a).- Control del tiristor de inversión  $ThI$ :

Se estudiará el circuito siguiente para:  $0 \leq t \leq t_2$

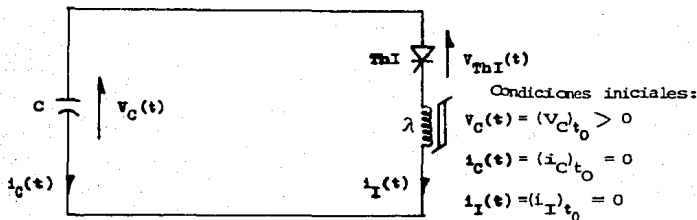


Fig. 4.2 Circuito de inversión de la carga del condensador C.

De este circuito, deducimos las ecuaciones siguientes:

$$i_C(t) = -c \frac{dv_C(t)}{dt} \quad , \quad -i_C(t) = i_I(t) \quad , \quad v_C(t) = \lambda \frac{di_I(t)}{dt}$$

Sustituyendo  $i_C(t) = i_I(t)$ , en la ecuación diferencial  $v_C(t)$  anterior :

$$v_C(t) = r \frac{d}{dt} \left( -C \frac{dv_C(t)}{dt} \right)$$

$$v_C(t) = -rC \frac{d^2 v_C(t)}{dt^2}$$

Igualando a cero la ecuación podremos establecer la siguiente ecuación diferencial para el circuito anterior:

$$v_C(t) + \lambda C \frac{d^2 v_C(t)}{dt^2} = 0$$

Por lo que la solución de esta ecuación para:

$$v_C(t) = (V_C)_{t_0} \cos \frac{\pi}{\sqrt{\lambda C} t} ; \text{ Para: } 0 \leq t \leq t_2$$

Por lo tanto se deduce que:

$$i_C(t) = -(V_C)_{t_0} \sqrt{\frac{C}{\lambda}} \operatorname{sen} \frac{t}{\sqrt{\lambda C}}$$

En un tiempo mayor que cero el tiristor de inversión es conductor pero en el instante  $t_2 = \pi / \sqrt{\lambda C}$ , la corriente del tiristor de inversión  $i_I(t)$  ~~se anula~~ y  $ThI$  se apaga (ver fig. 4.8 y 4.9). Durante la inversión de la carga del condensador, las pérdidas de Joule corresponden al 6% de la energía electrostática, es decir:

$$\text{el valor absoluto de } |(V_C)_{t_2}| < (V_C)_{t_0}$$

b).- Control del tiristor principal ThP. Se estudiará el circuito receptor de alimentación siguiente para:  $0 < t < t_3$

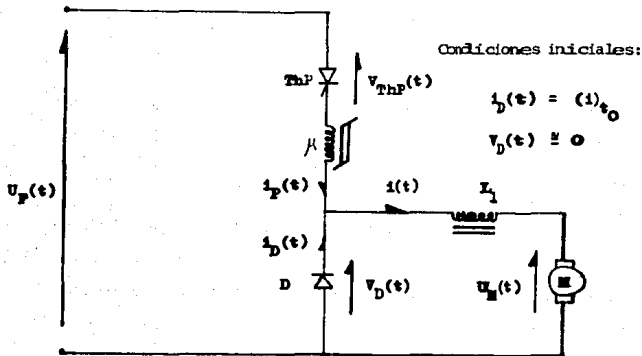


Fig. 4.3 Circuito receptor de alimentación

Del control del tiristor ThP que es conductor, así como el diodo de vía libre D; las ecuaciones que rigen este circuito son:

$$U_P(t) = L \frac{di_P(t)}{dt}$$

$$i_P(t) = i_D(t) = (i)_{t_0} = \text{cte.}$$

$$\frac{di_P(t)}{dt} + \frac{di_D(t)}{dt} = 0$$

Deduciendo las expresiones de la corriente del tiristor principal y de la corriente del diodo de vía libre

$i_p(t) = i_D(t)$  en función del tiempo se obtiene:

$$i_D(t) = (i)_{t_0} - \frac{U_F(t)}{\mu} (t) ; \text{ Para: } 0 \leq t < t_1$$

$$i_D(t) = \frac{U_F(t)}{\mu} (t) \quad \text{con } t_1 = \frac{(i)_{t_0}}{U_F(t) / \mu}$$

Después del bloqueo del diodo de vía libre D, la expresión de corriente del motor de tracción y del tiristor principal  $i(t) = i_2(t)$

$$i_2(t) = i(t) = (i)_{t_0} + \frac{U_F(t) - U_M(t)}{L_2} (t - t_1) \quad \text{con } t_1 \leq t \leq t_3$$

que es la expresión de corriente del tiristor principal -- ThP igual a la corriente  $i(t)$  del motor de tracción en excitación serie cuando el tiristor ThP está conduciendo; y con lo cual se asegura el abastecimiento de corriente -- constante; para los intervalos de tiempo comprendidos entre  $t_1$  y  $t_3$  (ver fig. 4.8 y 4.9), ya que el diodo de vía libre D se encuentra bloqueado.

c).- Control del tiristor de extinción o de paro ThE.

1.- Extinción del tiristor principal ThP

Se estudiará el circuito siguiente para:  $t_3 \leq t \leq t_4$

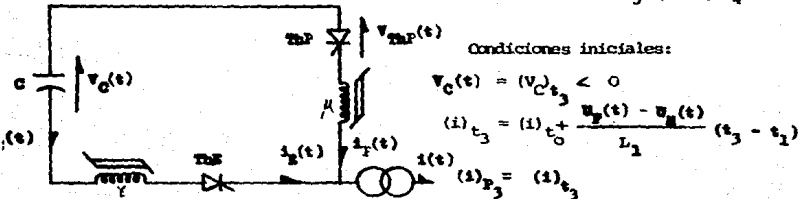


Fig. 4.4 Circuito de extinción del tiristor principal ThP.

Por la presencia de la resistencia  $R$  de la fig. 4.1. la carga del condensador  $C$  disminuye durante los intervalos de tiempo comprendidos entre  $t_2$  y  $t_3$ , siendo:

$$\text{el valor absoluto de } |(v_C)_{t_2}| > |(v_C)_{t_3}|$$

Del circuito se deduce las ecuaciones siguientes:

$$\mu \frac{di_p(t)}{dt} = \gamma \frac{di_E(t)}{dt} + v_C(t)$$

$$i_E(t) + i_p(t) = (i)_{t_3} \cong \text{cte.} \rightarrow \frac{di_E(t)}{dt} + \frac{di_p(t)}{dt} = 0$$

$$i_E(t) = i_C(t) = c \frac{dv_C(t)}{dt}$$

Substituyendo  $i_E(t) = i_C(t)$  en la ecuación anterior del circuito:

$$\begin{aligned} \frac{di_p(t)}{dt} &= -\frac{di_E(t)}{dt} \\ -\mu \frac{di_E(t)}{dt} &= \gamma \frac{d}{dt} \left( c \frac{dv_C(t)}{dt} \right) + v_C(t) \\ -\mu \frac{d}{dt} \left( c \frac{dv_C(t)}{dt} \right) &= \gamma \frac{d}{dt} \left( c \frac{dv_C(t)}{dt} \right) + v_C(t) \\ -c\mu \left( \frac{d^2 v_C(t)}{dt^2} \right) &= c\gamma \left( \frac{d^2 v_C(t)}{dt^2} \right) + v_C(t) \end{aligned}$$

Reduciendo e igualando a cero; podemos establecer la siguiente ecuación diferencial para el circuito de la fig.

$$C(\mu + \gamma) \frac{d^2 v_C(t)}{dt^2} + v_C(t) = 0$$

Por lo que la solución de esta ecuación para:

$$v_C(t) = (v_C)_{t_3} \cos \frac{t - t_3}{\sqrt{C(\gamma + \mu)}}; \quad \text{con } t_3 \leq t \leq t_4$$

Por lo tanto se deduce que:

$$i_C(t) = i_E(t) = - (v_C)_{t_3} \sqrt{\frac{C}{(\gamma + \mu)}} \operatorname{sen} \frac{t - t_3}{\sqrt{C(\gamma + \mu)}}$$

$$i_P(t) = (i)_{t_3} + (v_C)_{t_3} \sqrt{\frac{C}{(\gamma + \mu)}} \operatorname{sen} \frac{t - t_3}{\sqrt{C(\gamma + \mu)}}$$

El tiristor principal ThP está conduciendo hasta el tiempo  $t_4$ , mientras el tiristor de extinción o de paro ThE empieza a conducir debido a la carga del condensador de extinción C en el tiempo  $t_3$ , por lo que la corriente del condensador  $i_C(t)$  es igual a la corriente del tiristor de extinción  $i_E(t)$  más la corriente del tiristor principal  $i_P(t)$  aseguran el abastecimiento de corriente  $i(t)$  del motor de tracción (ver fig. 4.8 y 4.9) -

2.- Recarga del condensador C:

Se estudiará el circuito siguiente para:  $t_4 \leq t \leq t_5$  -

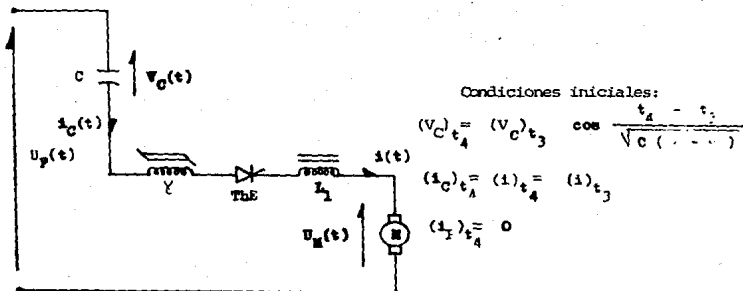


Fig. 4.5. Circuito de recarga del condensador C.

Del circuito de la fig. 4.5 se deducen las ecuaciones siguientes:

$$U_p(t) = V_C(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + U_M(t); \text{ de ahí que se desprecia } \gamma, \text{ y se considera } L_1; \text{ ya que } \gamma \text{ es la inductancia saturable que limita la velocidad de crecimiento de corriente en el tiristor de extinción o de paro.}$$

$$i(t) = i_C(t) = C \frac{dV_C(t)}{dt}$$

Substituyendo  $i(t) = i_C(t)$ , en la ecuación  $U_p(t)$  tenemos:

$$U_p(t) = V_C(t) + L_1 \frac{d(C \frac{dV_C(t)}{dt})}{dt} + U_M(t)$$

Esto nos permite establecer la ecuación diferencial siguiente:

$$U_p(t) = V_C(t) + \frac{L_1 C d^2 V_C(t)}{dt^2} + U_M(t)$$

Por lo que la solución de esta ecuación para:

$$V_C(t) = (U_p(t) - U_M(t)) + (U_M(t) - U_p(t) + (V_C)_{t_4}) \cos \frac{t - t_3}{\sqrt{L_1 C}} + (i)_{t_4} \sqrt{\frac{L_1}{C}} \operatorname{sen} \frac{t - t_4}{L_1 C}$$

para:  $t_4 \leq t \leq t_5$

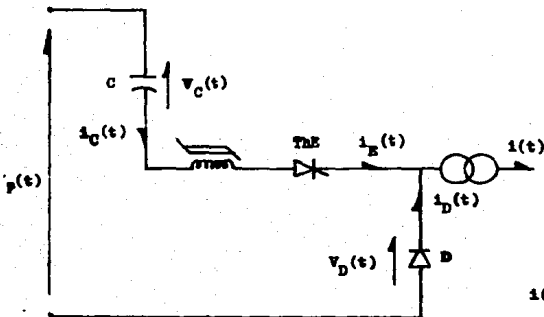
Por lo que se deduce que:

$$i_C(t) = i(t) = -\sqrt{\frac{C}{L_1}} (U_M(t) - U_P(t) + (V_C)_{t_4}) \operatorname{sen} \frac{t - t_4}{\sqrt{L_1 C}} + (i)_{t_4} \cos \frac{t - t_4}{\sqrt{L_1 C}}$$

Que son los valores de recarga del condensador de extinción C comprendidos entre los tiempos  $t_4$  y  $t_5$  por la tensión  $U_P(t)$  del "Chopper" por lo que la corriente  $i_C(t)$  es igual a la corriente  $i_E(t)$  del tiristor de extinción ThE; que es la corriente  $i(t)$  que alimenta al motor de tracción M. El tiristor de extinción ThE está en estado de conducción (ver fig. 4.9.)

d).- Apagado del tiristor de extinción ThE.

Se estudiará el circuito siguiente para:  $t_5 \leq t \leq t_6$



Condiciones iniciales:

$$(V_C)_{t_5} = U_P(t)$$

$$(V_D)_{t_5} = 0$$

$$(i_C)_{t_5} = (i)_{t_5}$$

Se obtiene el valor de  $(i)_{t_5}$  reemplazando  $t$  por  $t_5$  de la expresión anterior:

$$i(t) = f(t - t_4); \text{ con } t_4 \leq t \leq t_5$$

Fig. 4.6. Circuito de apagado del tiristor de extinción ThE.



De este circuito, nosotros deducimos las ecuaciones siguientes:

$$i_E(t) = i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt}$$

$$U_P(t) = V_C(t) + \gamma \frac{di_E(t)}{dt}$$

$$i_E(t) = i_D(t) = (i)_{t_5} \approx \text{cte.} \rightarrow \frac{di_E(t)}{dt} + \frac{di_D(t)}{dt} = 0$$

Substituyendo  $i_E(t) = i_C(t)$ , en la ecuación  $U_P(t)$  tenemos:

$$U_P(t) = V_C(t) + \gamma \frac{d(C \frac{dv_C(t)}{dt})}{dt}$$

Esto nos permite establecer la ecuación diferencial siguiente:

$$U_P(t) = V_C(t) + \gamma C \frac{d^2 v_C(t)}{dt^2}$$

Por lo que la solución de esta ecuación para:

$$V_C(t) = U_P(t) + (i)_{t_5} \sqrt{\frac{\gamma}{C}} \operatorname{sen} \frac{t - t_5}{\sqrt{\gamma C}}; \text{ Para: } t_5 \leq t \leq t_6, \text{ con } t_6 - t_5 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\gamma C}$$

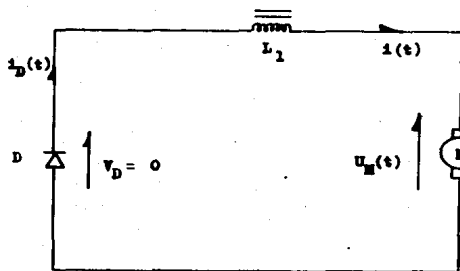
$$i_C(t) = i_E(t) = (i)_{t_5} \cos \frac{t - t_5}{\sqrt{\gamma C}}$$

$$i_D(t) = (i)_{t_5} (1 - \cos \frac{t - t_5}{\sqrt{\gamma C}})$$

El condensador C de extinción está cargado entonces el tiristor de extinción  $ThE$  empieza a conducir y a circular una corriente  $i_C(t)$  del condensador igual a la corriente  $i_E(t)$

del tiristor de extinción hacia el motor  $i(t)$  en un tiempo  $t_5$ , (ver fig. 4.9). Después el tiristor de extinción  $ThE$  se apaga y el diodo de vía libre  $D$  conduce una corriente  $i_D(t)$  del diodo que es igual a la corriente del motor  $i(t)$ .

e).- Circuito de vía libre.



Al instante  $t_6 = t_5 + \frac{\sqrt{L_1 C}}{2}$

$ThE$  se apaga.

$$(v_C)_{t_6} = U_p(t) + (i)_{t_5} \sqrt{\frac{L_1}{C}} = (v_C)_{t_0}$$

$$(i)_{t_6} \cong (i)_{t_5}$$

Fig. 4.7. Circuito de vía libre.

La expresión de corriente  $i(t)$  durante los intervalos de tiempo comprendidos entre  $t_6$  y  $t_7$  son:

$$i_D(t) = i(t) = (i)_{t_6} - \frac{U_M(t)}{L_1} (t - t_6) \quad ; \quad \text{para: } t_6 < t < t_7 = T$$

Para un tiempo  $t_6$  el diodo de vía libre  $D$  ya es conductor, la inductancia de alizamiento  $L_1$ , hace que la corriente  $i_D(t)$  del diodo sea constante e igual a la corriente  $i(t)$  del motor; permitiendo reducir de forma continua la tensión media  $U_M(t)$  aplicada al motor (ver fig. 4.9).

#### 4.1.2. CAMBIO DE TENSIONES Y CORRIENTES DE SEMICONDUCTORES (PARA EL ALIMENTADOR DE CORRIENTE A FRECUENCIAS SUBMÚLTIPLES Y PARAMETRADAS)

Se representan en la fig. 4.8, la gráfica de los cambios en función de los tiempos característicos; de las tensiones  $v_{ThP}(t), v_{ThE}(t), v_{ThI}(t), v_D(t)$ ; y de las corrientes  $i_p(t), i_B(t), i_I(t), i_D(t)$ ; durante los intervalos de tiempo comprendidos entre  $t_0$  y  $t_2$ .

En la fig. 4.9. se representan los mismos parámetros durante los intervalos de tiempos comprendidos entre  $t_3$  y  $t_6$ .

#### 4.1.3. SELECCION DE SEMICONDUCTORES

La selección está en función de las características de los semiconductores de potencia, así como de los resultados demandados del alimentador de corriente (CHOPPER). Los cambios en función de los parámetros de tiempo, tensión y corriente de los semiconductores están representados en la fig. 4.8 y 4.9.

##### 4.1.3.1 TIRISTOR PRINCIPAL $ThP$

El tiristor principal es de tipo rápido; a medida que los tiempos de extinción  $t_q$  por conmutación del circuito son inferiores, (ver fig. 4.8 y 4.9). Estos tiempos están en función del valor del condensador  $C$ , de la intensidad de corriente del motor  $i(t)$ ; y de la tensión de línea de ali-

mentación  $U_F(t)$ .

La tensión de polarización directa  $V_{DRM}$  al estado de bloqueo y la tensión de polarización inversa  $V_{RRM}$  a los bornes del tiristor principal son iguales a la tensión de líneas  $U_P(t)$ .

La corriente máxima que circula en el tiristor principal  $ThP$  es igual a:

$$I_P(t) = \bar{I} + \frac{U_P(t) T}{8L_1}$$

Donde  $\bar{I}$  es la corriente de placa del motor y  $T$  es el periodo total de funcionamiento.

La intensidad máxima determina el nivel de disparo del disyuntor D.E.T. El funcionamiento del tiristor principal  $ThP$  se realiza por medio de dos tiristores asociados en serie que son: el tiristor de extinción  $ThE$  y el tiristor de inversión  $ThI$ .

#### 4.1.3.2 TIRISTOR INVERSION $ThI$

El tiristor de inversión  $ThI$  es del tipo rápido, considerando que los tiempos de polarización inversa de tensión son para una conducción cíclica fiable, mínima igual al del tiristor principal.

Los valores máximos de la tensión de polarización directa  $V_{DRM}$  al estado de bloqueo y de la tensión de polarización inversa  $V_{RRM}$  a los bornes del tiristor de inversión son iguales en valor absoluto a  $|(V_C) t_0|$ .

La corriente máxima que circula en el tiristor de inversión  $ThI$  es igual a:

$$i_I(t) = (V_C) t_0 \sqrt{\frac{C}{\lambda}}$$

Los tiempos de conducción del tiristor de inversión -  $ThI$  son:

$$t_2 = \pi \sqrt{\lambda C}$$

La función del tiristor de inversión  $ThI$  se realiza - por medio de dos tiristores que son el tiristor principal -  $ThP$  y el tiristor de extinción  $ThE$ .

#### 4.1.3.3 TIRISTOR DE EXTINCIÓN $ThE$ .

El tiristor de extinción  $ThE$  es del tipo rápido, asegura el funcionamiento del alimentador de corriente (CHOPPER), cuando el rendimiento de conducción cíclica tiene un valor - cercano a la unidad. Los tiempos de polarización en tensión inversa son en este caso igual a:

$$\frac{\pi}{2} \sqrt{\lambda C} - t_1$$

Las restricciones en tensión son prácticamente idénticas a las del tiristor de inversión TH1.

La corriente máxima que circula en el tiristor de extinción THE es igual a:

$$i_E(t) = \sqrt{\frac{C}{L_1} (U_M(t) - U_P(t) + (V_C)_{t_3})^2} \cdot i_P^2$$

La intensidad máxima determina regularmente el nivel de disparo de los disyuntores D.E.T.

La función del tiristor de extinción THE se realiza por medio de dos tiristores que son el tiristor principal - THP y el tiristor de inversión TH1.

#### 4.1.3.4. DIODO DE VIA LIBRE D.

El Diodo de vía libre D es del tipo rápido fig. 4.7, - con un tiempo fiable de recuperación y cuyas características son:

La tensión inversa máxima es cercana a  $2U_P(t)$ .

La intensidad máxima es del orden de  $i_E(t)$ .

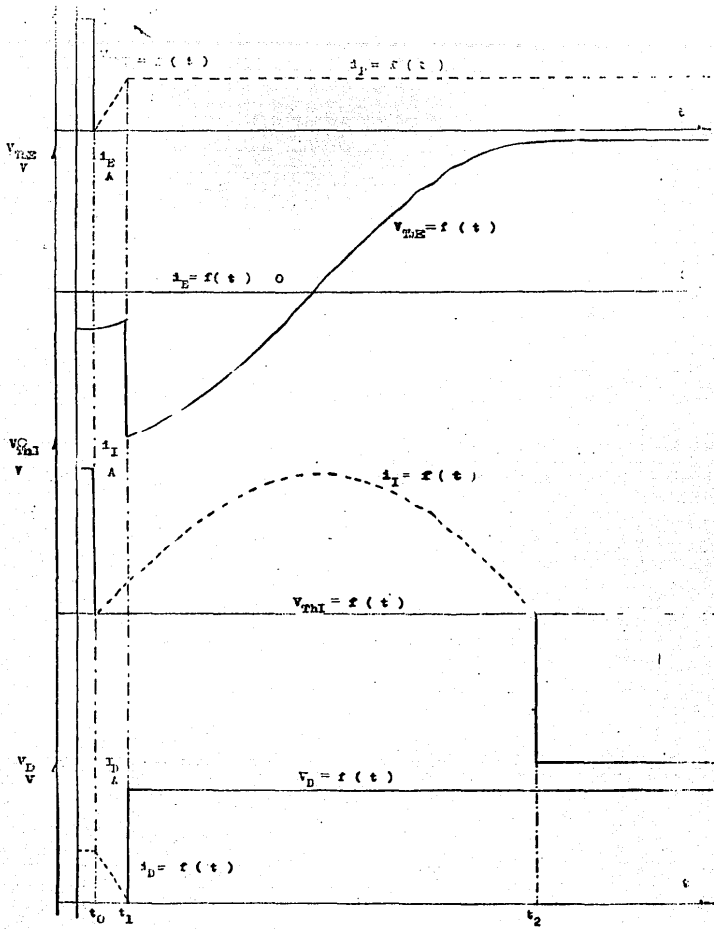


FIG. 4.0 Gráfica de los cambios en función de los tiempos característicos de tensiones y corrientes (para,  $t_0 < t < t_2$ ).

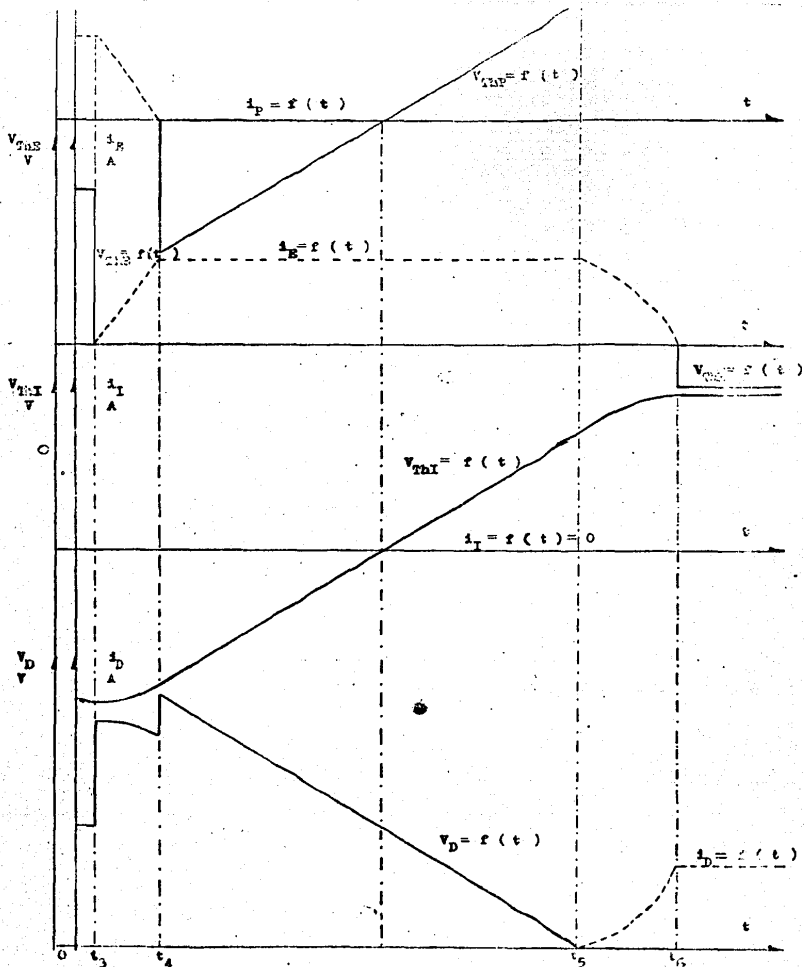


FIG. 4.9 Gráfico de los cambios de en función de los tiempos característicos de los elementos y constantes (para,  $t_3 \leq t \leq t_6$ ).



#### 4.2 PRINCIPIO DE EMPARALELAMIENTO PROGRESIVO DEL INDUCTOR

Después de un periodo de arranque, la variación de la velocidad del tren se obtiene por el emparelamiento de los inductores de los motores de tracción.

Con un equipo de tipo JH, el método clásico utilizado se basa por la puesta en paralelo a los bornes de los inductores; de una inductancia en serie con una resistencia que lo cortocircuita parcialmente en cualquier posición programada de (CRAN); (ver figura 4,10) .

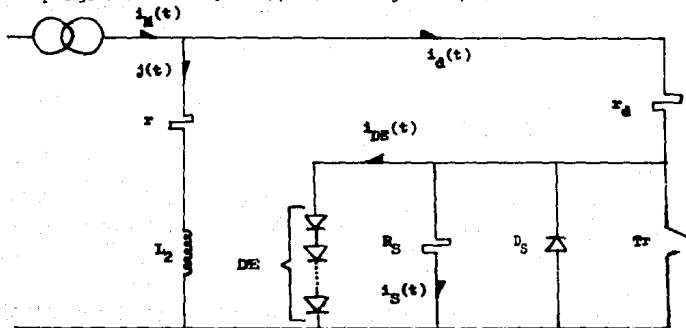


Fig. 4.10 Principio de emparelamiento (por transistores)

Los elementos que constituyen el emparelamiento progresivo por transistores son:

$r$  = resistencia de dos inductores en serie.

$L_2$  = inductancia de los inductores en serie.

$R_d$  = resistencia de emparelamiento.

$R_S$  = resistencia de emparelamiento permanente.

DE = rectificador constituido de 28 diodos asociados en serie.

$D_S$  = diodo de vfa libre de emparelamiento

Tr = grupo de 16 transistores asociados en paralelo.

La utilización del alimentador de corriente permite el desarrollo de los circuitos de emparelamiento constituidos por semiconductores fig. 4.11.

La presencia de la inductancia de alizamiento  $L$  en serie con el inducido del motor, hace más innecesario el empleo de la inductancia de emparelamiento utilizadas en el material clásico. Por lo que el frenado eléctrico y el emparelamiento progresivo (variación de velocidad del tren) - favorecen el control y la estabilidad de la generatriz.

Nosotros plantearemos el tipo de emparelamiento progresivo usado en el tren.

#### 4.2.1 EMPARALELAMIENTO PROGRESIVO POR TRANSISTORES (ASOCIADOS A UN ESQUEMA TRIFASICO)

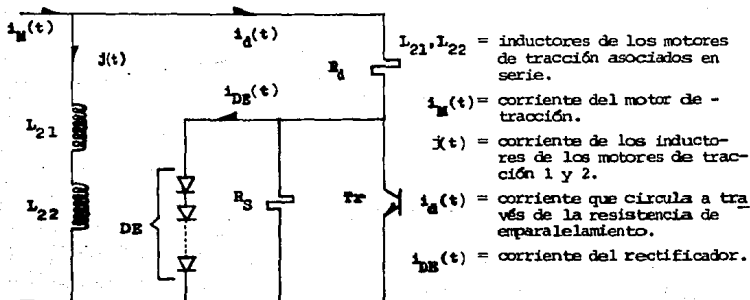


Fig. 4.11. Esquema del principio de emparelamiento progresivo por transistores.

Se constituye mediante transistores de potencia un Chopper de corriente conectada a los bornes del inductor del motor de tracción. En los instantes de bloqueo de los transistores, la tensión a los bornes se limita mediante un montaje "DE" que es un rectificador compuesto por diodos asociados en serie.

La resistencia de emparelamiento permanente  $R_S$  elimina la ondulación de flujo en el inductor y por consiguiente favorece la conmutación de los motores.

La conducción total se realiza cuando la máxima tracción es solicitada (en el manipulador: 100mA en el control continuo).

La conducción total se traduce por la carencia de órdenes de paro, ya que los órdenes de marcha se envía al tiristor de marcha ThP (figura 4.1), en fase y a la frecuencia de 1080 Hz. La proporción de conducción del Chopper propiamente dicho llega a ser de 1.

El paso de conducción total así como el regreso de --conducción a conducción normal se acompaña de un control particular de la proporción de emparelamiento.

Efectivamente, la facultad del control del emparelamiento progresivo con una cadena de regulación independiente del control del Chopper permite limitar las variaciones de la corriente inducida.

#### 4.3. FRENADO ELECTRICO DE AUTOMOTRICES URBANAS

El frenado eléctrico de automotrices urbanas se realiza de dos maneras fundamentales:

El frenado reostático o frenado dinámico y el frenado regenerativo o por recuperación de energía a la red. La energía cinética de las automotrices es transformada en --energía eléctrica por los motores (cuando funcionan como --generatriz) y disipada en reostatos, en un primer caso; --y en un segundo caso esa energía se reenvía a la fuente de alimentación.

Hasta hace unos cuantos años, el frenado reostático era el más común. Esto se debía principalmente a que en los equipos convencionales, el funcionamiento de un motor a excitación serie, funcionaba como generador sobre la red de alimentación, lo cual la hacía inestable. Otro de los problemas consistía en que este tipo de frenado únicamente se mantenía hasta  $1/4$  ó  $1/3$  de la velocidad máxima del motor. Esta velocidad es la velocidad a partir de la cual la fuerza electromotriz de la generatriz se vuelve inferior a la tensión de la fuente de alimentación.

La técnica del "Alimentador de corriente" ("CHOPPER") da grandes posibilidades al frenado por recuperación de energía a la red, ya que posee una dinámica elevada que hacen posible una marcha estable en frenado casi hasta el paro total del vehículo. Permite sin embargo, una restricción para esta técnica: la mayoría de las subestaciones de rectificación que aumentan la tensión de línea en corriente continua, son equipadas con rectificadores a diodos que no permiten el reenvío de la energía hacia la red alterna. Así pues, en el mismo momento de regeneración, la energía regenerada en frenado debe ser inmediatamente aceptada.

Cuando la recuperación de energía no es posible, se consideran dos soluciones:

- a).- Se disminuye o se substituye el frenado eléctrico por frenado mecánico.
- b).- Se substituye instantánea y automáticamente el frenado por recuperación de energía a la red por un -- frenado reostático o dinámico.

#### 4.3.1 FRENADO POR RECUPERACION DE ENERGIA A LA RED (FRENADO REGENERATIVO)

En tracción eléctrica se utilizan motores con excitación serie, es decir, que los devanados del inductor están en serie con el inducido. El frenado regenerativo o -- por recuperación de energía a la red, se logra operando el motor como generatriz conectado a la fuente de alimentación del sistema; de esta forma, la energía mecánica es transferida en energía eléctrica y regresada a la fuente de alimentación para ser reutilizada. En frenado se utiliza el -- "alimentador de corrientes" ("CHOPPER") elevador de tensión. Cuando más pequeña es la velocidad de la generatriz (motor de tracción) y por lo tanto su fuerza electromotriz  $E'$ , más se reduce el nivel de conducción del tiristor principal  $ThP$ .

En la fig. 4.12 se muestra el esquema del alimentador de corriente en montaje paralelo para el frenado por -- recuperación. Al comienzo del frenado, la tensión media  $U_G$  desarrollada por la generatriz es muy débil. La carga alma

cedada en el condensador C debe ser suficiente para provocar la extinción del tiristor principal ThP.

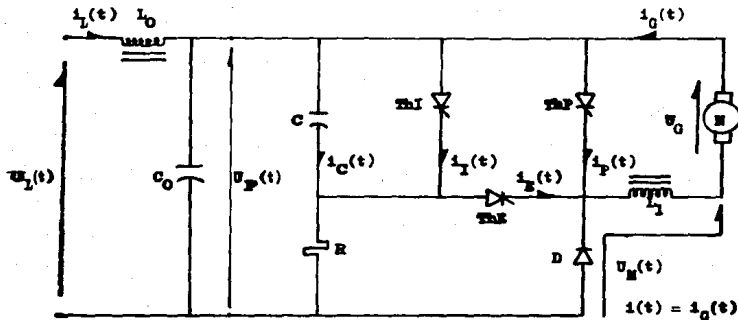


Fig. 4.12 Esquema del alimentador de corriente elemental en montaje paralelo para el frenado por recuperación.

La generatriz está en paralelo con el tiristor ThP y la tensión media  $U_G$  es:

$$U_G = U_F(t) - U_M(t)$$

Donde  $U_F(t)$  es la tensión de ondulación a los bornes del "alimentador de corriente" y  $U_M(t)$  la tensión del motor (ahora conmutado como generatriz). En un periodo de funcionamiento del alimentador de corriente, su valor medio de la tensión y corriente aplicada a la fuente  $U_L(t)$  que antes la alimentaba es:

$$U_G = (1 - \infty) U_L(t)$$

$$i_G(t) = \frac{1}{(1 - \infty)} i_L(t)$$

$i_L(t)$  es la corriente de la fuente o corriente de línea.

Esto explica la presencia del condensador C que hace que se extinga el tiristor principal; así como la presencia de la resistencia R de carga inicial del condensador.

Comutación estática tracción - frenado.

Con ayuda de otros conmutadores estáticos se modifica la configuración del circuito anterior, quedando como el de la fig. 4.13.

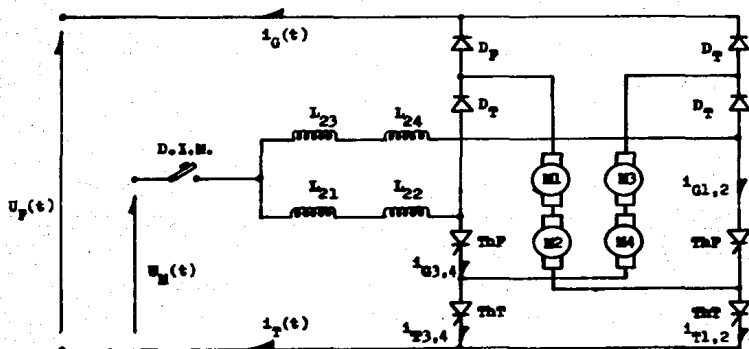


Fig. 4.13 Esquema del principio de conmutación estática, tracción - frenado.



<b>ThP</b> .....	Tiristor de frenado	
<b>D<sub>F</sub></b> .....	Diodo de frenado.	
<b>i<sub>T</sub>(t)</b> .....	Corriente en tracción	
<b>i<sub>G</sub>(t)</b> .....	Corriente en frenado	
<b>D<sub>T</sub></b> .....	Diodo de tracción	
<b>i<sub>T<sub>1,2</sub></sub></b> .....	Corriente en tracción de los motores 1 y 2	
<b>i<sub>T<sub>3,4</sub></sub></b> .....	Corriente en tracción de los motores 3 y 4	
<b>i<sub>G<sub>1,2</sub></sub></b> .....	Corriente en frenado de los motores 1 y 2	
<b>i<sub>G<sub>3,4</sub></sub></b> .....	Corriente en frenado de los motores 3 y 4	
<b>L<sub>21</sub></b> .....	Inductor del motor M <sub>1</sub> .	M <sub>1</sub> .... Inducido del motor M <sub>1</sub>
<b>U<sub>M</sub>(t)</b> .....	Tensión del motor	U <sub>F</sub> (t)...Tensión del filtro de línea
<b>U<sub>L</sub>(t)</b> .....	Tensión de línea	<b>ThT</b> .....
		Tiristor de tracción

**D.I.M.**.... Disyuntor desconectador de tipo ultrarápido cuyo tiempo de intervención mecánica es del orden de 2.5 m.s. (estos disyuntores aseguran la protección de los semiconductores de potencia contra las sobreintensidades. Protege el contacto cerrado por el circuito de frenado).

**D.E.T.**.... Disyuntor del tipo ultrarápido cuyo tiempo de intervención mecánica es del orden de 2.5m.s. Desconectador para alimentación de los motores. (este disyuntor está dispuesto a la cabeza del circuito).

De forma que se puede utilizar el mismo tiristor principal ThP; como el del esquema de la fig. 2.10 capítulo

II, en donde los tiristores principales están representados por los interruptores estáticos  $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_3$  (tiristores de marcha).

- 1.- En tracción (como motor), los diodos de tracción  $D_T$  y los tiristores de tracción  $ThT$  de la fig. 4.13, están conduciendo, los inductores  $L_{21}$ ,  $L_{22}$ ,  $L_{23}$  y  $L_{24}$ , están respectivamente en serie con los inducidos  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$ ,  $M_4$ .

Para autorizar el encendido de los tiristores de frenado  $ThF$ , es necesario que los tiristores de tracción  $ThT$  se encuentren bloqueados; así mismo, para permitir el accionamiento de los tiristores de tracción, hay que asegurarse de que los tiristores de frenado no sean conductores (no conduzcan). La corriente de salida en los diodos de tracción  $D_T$  es inversa e inferior a la intensidad de corriente hipostática que mantienen los tiristores de tracción  $ThT$ .

- 2.- En frenado por recuperación de energía a la red (como generatriz), los inductores  $L_{21}$ ,  $L_{22}$ ,  $L_{23}$  y  $L_{24}$  están respectivamente en serie con los inducidos  $M_3$ ,  $M_4$  y  $M_1$ ,  $M_2$ . La conmutación de los inductores con relación a los inducidos aseguran la estabilidad de marcha de las generatrices en paralelo. Esta conmutación es el paso necesario, ya que 3 alimentadores constituyen el equipo de tracción.

ción - frenado del metro de la Ciudad de México.

Los tiristores ThT y ThF se apagan por la anulación de la corriente en los tiristores principales ( $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_3$ ).

En el frenado por recuperación la condición de estabilidad del sistema compuesto de la generatriz a excitación serie y del alimentador de corriente es:

La tensión a los bornes de la generatriz  $U_G$  no debe jamás ser superior a la tensión de línea  $U_F(t)$ .

Cuando el tiristor principal ThP está conduciendo, - la tensión a los bornes de la generatriz es:

$$U_G(t) = L_1 \frac{di(t)}{dt}$$

donde  $L_1$  es la inductancia de alimentación del alimentador de corriente.

El punto de funcionamiento M se evalúa hacia el punto A, punto de funcionamiento inestable fig. 4.14.

Cuando el diodo de vía libre conduce, la ecuación diferencial que rige el circuito es:

$$U_G(t) = U_F(t) - U_M(t)$$

$U_F(t) = U_G - L_1 \frac{di(t)}{dt}$  con la condición que  $U_G(t) < U_F(t)$ , la corriente decrece y el punto de funcionamiento se desplaza - hacia O fig. 4.14.

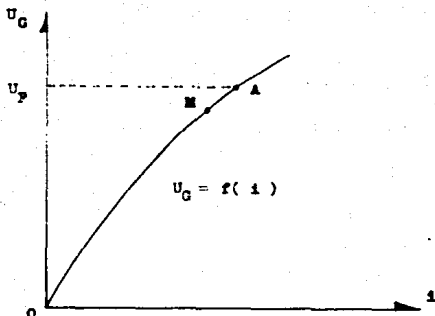


Fig. 4.14 Cambio del punto de funcionamiento M.

#### 4.3.2 FRENADO REOSTATICO (o FRENADO DINAMICO)

El frenado reostático o frenado dinámico, se logra operando el motor como generatriz, de tal forma que la energía mecánica se transforma en energía eléctrica, pero en lugar de regresarla al sistema como una regeneración se disipa en forma de calor en resistencias conectadas al motor (generatriz) como una carga eléctrica. Se utiliza también como en el frenado por recuperación un "alimentador de corriente" ("CHOPPER") elevador de tensión.

La generatriz envía la corriente media  $i_G(t)$  sobre el reostato  $R_h$  (ver fig. 4.15) 6 sobre el tiristor principal ThP. Cuando mayor es el intervalo de conducción del tiristor principal más tiempo se mantiene cortocircuitado la resistencia  $R_h$  y menor es la resistencia montada a los bornes de la generatriz. De esta forma se puede mantener -

la corriente media  $i_G(t)$  constante cuando la velocidad y por tanto la fuerza electromotriz  $E'(t)$  disminuyen.

En la fig. 4.15. se muestra el esquema del principio del alimentador de corriente en montaje paralelo para el frenado reostático.

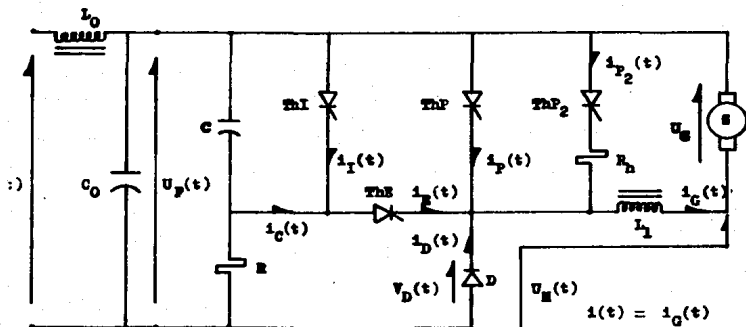


Fig. 4.15 Esquema del principio del alimentador de corriente elemental en montaje paralelo para el frenado reostático.

La generatriz está en paralelo con el tiristor principal ThP, la tensión media del "alimentador de corriente"  $U_G$  es:

$$U_G = R_n i_G(t)$$

Donde  $R_n$  es el reactivo de frenado e  $i_G(t)$  es la corriente media enviada al reactivo de frenado ó al tiristor principal.

La tensión de ondulación  $U_p(t)$  a los bornes del "alimentador de corriente" es:  $U_p(t) = V_D(t) + U_G$

Donde  $V_D(t)$  es la tensión del diodo de vía libre D ó tensión del motor (ahora conmutado como generatriz) y es igual a:

$$V_D(t) = U_p(t) + R_h i_G(t)$$

Por medio de la intervención de un segundo tiristor principal  $ThP_2$  (tiristor de frenado reostático) como se muestra en las figs. 4.15 y 4.16.

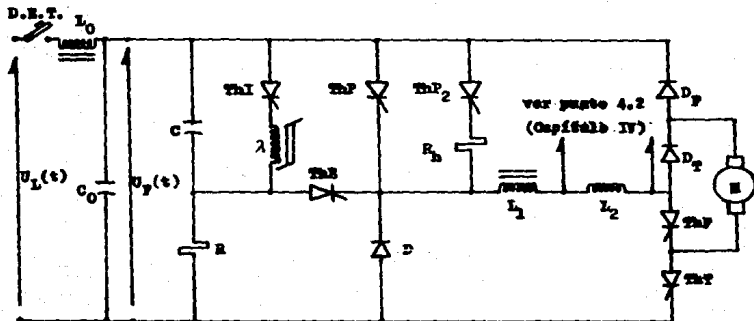


Fig. 4.16 Esquema del principio de un alimentador de corriente durante el frenado reostático.

Se conecta el reostato de frenado  $R_h$  a los bornes de la generatriz. El control de este mismo tiristor origina el funcionamiento del diodo de vía libre D. La extinción del tiristor  $ThP_2$  se obtiene con el desbloqueo del tiristor principal  $ThP$  (es un equipo de seis tiristores suplementarios, siendo dos por fase y asociados en serie). El tiristor  $ThP_2$  controla la extinción del tiristor de extinción  $ThE$ .

El "Chopper" funciona en frenado, como Chopper elevador de tensión. Sin embargo, el tiristor  $ThP_2$  manda -- aquí una vez apagado el tiristor de extinción  $ThE$ .

El valor Ohmico de  $R_h$  es adaptado al funcionamiento de los motores como generatriz serie y a la corriente suministrada por los motores.

La energía que se puede disipar en las tres ramas reostáticas, una rama por fase, es tal, que la energía absorbida por el tren de frenado reostático equivale aproximadamente al 30% de la energía cinética total de tren.

Se prevén dos casos en la intervención del frenado -- reostático:

- 1).- Si la autorización de recuperación está dada, el disyuntor D.E.T. que está dispuesto a la cabeza del circuito permanece en posición de trabajo.

El frenado reostático interviene de modo irreversible si  $U_L(t)$  llega a 850 V de c.d. efectivamente, a esa tensión, el nivel de corriente enviada en línea, que disminuye cuando  $U_L(t)$  sube, es tal que la energía del frenado por recuperación sería inferior a la energía del frenado reostático.

2).- Si la autorización de recuperación no está presente, el disyuntor D.E.T. que está dispuesto a la cabeza del circuito permanece en posición de reposo.

El frenado reostático es irreversible. Una resistencia auxiliar R (de carga inicial del condensador C) se conecta a los bornes del condensador  $C_0$  del filtro a fin de mantener la tensión  $U_p(t)$  del mismo a nivel normal.

#### 4.3.2.1 PREDETERMINACION DEL REOSTATO DE FRENADO $R_h$

Si durante los tiempos  $(1 - \alpha)T$  el diodo de vía libre D no conduce, nosotros podemos escribir:

$$v_D(t) \geq 0 \rightarrow U_p(t) - R_h i(t) \geq 0 \rightarrow \frac{U_p(t)}{R_h} \geq i(t)$$

Durante el frenado por recuperación; la tensión a los bornes de la generatriz  $U_G(t)$  no debe jamás ser superior a la tensión de la línea  $U_p(t)$  (que es la primera condición necesaria de estabilidad). Esto trae como consecuencia la de provocar el decrecimiento de corriente  $i(t)$  durante la conducción del diodo de vía libre D.



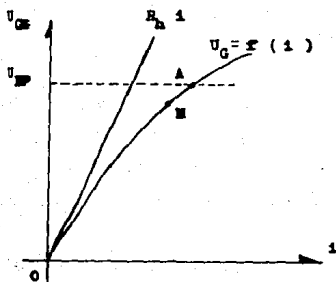
En el frenado reostático, cuando el tiristor  $ThP_2$  conduce, la ecuación diferencial que rige el circuito es:

$$U_G = L_1 \frac{di(t)}{dt} + R_h i(t) \rightarrow L_1 \frac{di(t)}{dt} = U_G - R_h i(t)$$

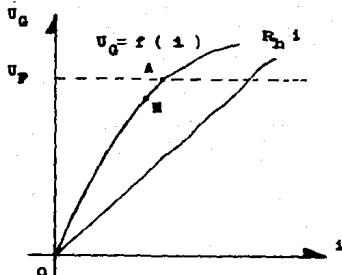
$L_1$ : es la inductancia de alizamiento del alimentador de corriente

Para que el punto de funcionamiento M se evalúe hacia cero, es necesario que la corriente  $i(t)$  disminuya, es decir:

$$U_G - R_h i(t) < 0 \rightarrow i(t) > \frac{U_G}{R_h}$$



Funcionamiento estable.



Funcionamiento inestable.

Fig. 4.17. Cambio del punto de funcionamiento M.

Para el frenado reostático de nuestro desarrollo, nosotros enunciamos una segunda condición necesaria de estabilidad:

El valor de la resistencia  $R_h$  del reactato de frenado debe ser siempre superior al valor de las resistencias críticas de descarga de características  $U_0 = f(i)$ .

En caso contrario, el punto M se acerca al punto A cuando el tiristor de frenado reactático  $ThP_2$  es conductor. Este cambio continúa durante la conducción del tiristor principal  $ThP_1$  y en algunos periodos de funcionamiento el punto A es alcanzado.

La resistencia  $R_h$  debe satisfacer a las dos desigualdades siguientes:

$$\frac{U_p}{i(t)} \geq R_h \geq \frac{U_G}{i(t)}$$

Cada motriz del metro de la Cd. de México, se compone por cuatro motores de tracción, dos por bogie. Los motores de un bogie están conectados en serie. El valor de la tensión de línea  $U_{p3} = 800$  v (donde  $U_{p3}$  es la tensión para el control del tiristor principal  $ThP_2$ ).

El valor de corriente máxima en frenado por motor es de 600 A. Si nosotros deseamos respetar la primera desigualdad:

$$\frac{U_{p3}}{I} \geq R_h$$

Donde  $U_{FS} = 800$  v tenemos que  $\frac{800}{600} \frac{v}{A} \geq 1.33$  ,

tres fases producen una corrient-

te  $I = 600$  A en paralelo en las máquinas giratorias, así el valor de  $R_h$  por fase es  $\frac{1.33 \times 3}{2} = 2 \Omega \geq R_h$ .

#### 4.3.2.2 VENTAJAS DEL CONTROL DE EMPARALELAMIENTO PROGRESIVO

Se presenta en la fig. 4.18 las características  $U_G = f(i)$  de dos generatrices asociadas en serie. La tensión de la línea es de 800 v, la referencia de tensión  $U_M$  de entrada es de 160 v y la tensión máxima de la generatriz es luego de 640 v, recta A A'. La regulación de emparalelamiento fijo nos da el porcentaje de emparalelamiento - por lo que la tensión  $U_M$  no debe ser inferior a 1,2 ref.  $U_M$  de entrada, donde la tensión de la generatriz es de - 608v, recta B B'.

Para una velocidad de rotación de los motores de 2500 r.p.m., lo que corresponde a una velocidad del tren de -- 65 Km/hr, y para la referencia máxima de par electromagnético, el punto de funcionamiento está situado en  $M_1$ . En tal caso el porcentaje de emparalelamiento es  $\phi = 66\%$ , valor máximo autorizado al metro de la Ciudad de México.

La referencia del par electromagnético, según las instrucciones de pilotaje automático puede imponer una corriente  $i = 400$  A. Durante el pilotaje, la regulación de empa-

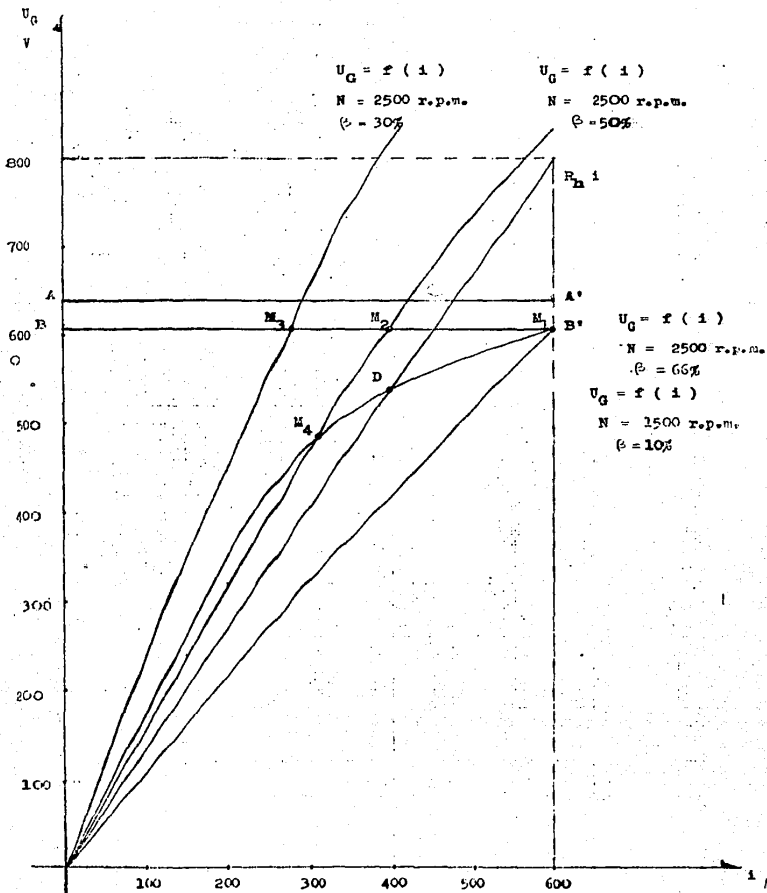


FIG. 4.18 Características  $U_G = f(i)$ , de dos generatrices asociadas en serie.

raleamiento mantiene la tensión de la generatriz constante al punto  $M_2$  y fija el valor de porcentaje de empareamiento  $\beta = 50\%$ . Para lo mismo, si la corriente demandada es de 280 A, el punto de funcionamiento estará en  $M_3$  con un porcentaje de empareamiento  $\beta = 30\%$ .

Si el punto de funcionamiento  $M_1$ , es un punto de funcionamiento estable, porque  $i(t) > \frac{U_G}{R_h}$ , éste es el mismo caso para los puntos  $M_2$  y  $M_3$ .

Para una velocidad de rotación de los motores de 1500 r.p.m., y que corresponde a una velocidad del tren de 39 Km/hr, el regulador de empareamiento fig. 4.19, no interviene más; el porcentaje de empareamiento es mínima  $\beta = 10\%$ . Para los valores de corriente  $i(t)$  superiores a 400 A, los puntos de funcionamiento comprendido entre D y B; satisfacen la condición de estabilidad  $i(t) > \frac{U_G}{R_h}$

Por lo que no existe alguna posibilidad de ajuste del par electromagnético para las intensidades inferiores a -- 400 A, que son los puntos de funcionamiento comprendidos entre O y D. Si el punto de funcionamiento se encuentra en  $M_4$ ,  $i(t) < \frac{U_G}{R_h}$ , por lo que el tiristor  $ThP_2$  es conductor, la corriente  $i(t)$  aumenta. Entonces en su continuo crecimiento de conducción del tiristor  $ThP$  y así sucesivamente hasta que el punto de funcionamiento  $M_4$  se identifique con el punto D.

a).- Tipo de control:

Con respecto a las desigualdades siguientes:

$$R_h i(t) (1 - \varphi) - r(t) (1 - \varphi) - R i(t) < R_h i(t)$$

$r$  = resistencia del inductor.

$R$  = resistencia del inducido.

El valor de la resistencia  $R_h$  del reostato de frenado es siempre superior al valor de las resistencias críticas de descarga de características  $U_G = f(i)$ .

La condición de estabilidad se realiza, si nosotros verificamos la relación entre el porcentaje de emparellamiento  $\beta$  y la velocidad de rotación de los motores:

$$\beta = 1 - \frac{R_h' + R}{K N - r}, \quad \text{con } R_h' \text{ resistencia media de la resistencia } R_h$$

El emparellamiento progresivo del equipo de tracción del metro de la Ciudad de México se realiza por medio de transmisores de potencia.

b).- Se recomienda otra solución:

Nosotros medimos la tensión de la generatriz  $U_G = U_F - U_M$  y nosotros la comparamos a una referencia de tensión de la generatriz igual a  $R_h' i(t)$ . Si el circuito está activado para  $U_F \geq 800$  v y cercana a la tensión delinea, el regulador de emparellamiento fijo da la relación de conducción cíclica "h" por lo que  $U_G = \text{réf. } U_G$

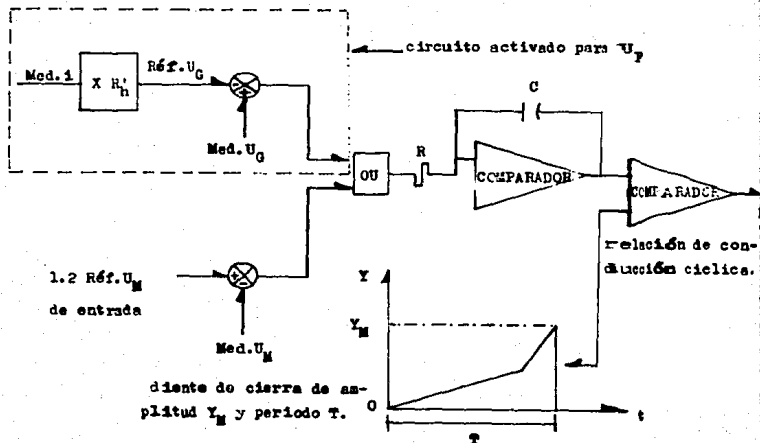


Fig. 4.19. Regulación de la tensión de la generatriz por medio del emparellamiento progresivo (regulador de emparellamiento).

#### 4.3.2.3 TRANSICIÓN DE FRENADO ELÉCTRICO POR RECUPERACIÓN A FRENADO REOSTÁTICO

La transición entre dos modos de frenado eléctrico no es un paso instantáneo.

Nosotros autorizamos el control del tiristor  $ThP$  mediante una tensión de línea de 800 v. a medida que la tensión de la línea aumenta los tiempos relativos del tiristor  $ThP_2$  crecen.

Para  $U_P = 850$  v, la corriente renovada en la red es nula.

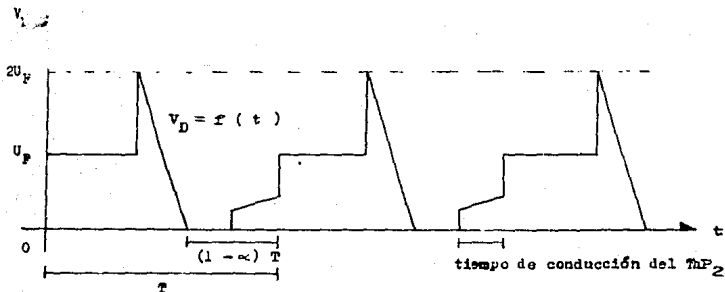


Fig. 4.20 Cambios en función de los tiempos de la tensión a los bornes del diodo de vía libre. La tensión de línea  $U_P$  es de 825 v.

El control del ThP<sub>2</sub> puede ser como sigue:

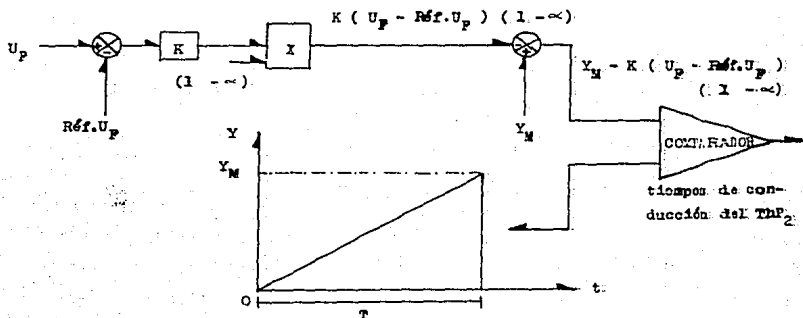


Fig. 4.21. Circuito de control del ThP<sub>2</sub>.



Nosotros fijaremos la referencia de tensión de línea a 800 v. para  $U_F = 850$  v, (ref.  $U_F = 800$ v) :

$$K (U_F - \text{ref. } U_F) = Y_M \longrightarrow K = \frac{U_F - \text{ref. } U_F}{Y_M}$$

Nosotros multiplicaremos la expresión  $K (U_F - \text{ref. } U_F)$  por  $(1 - \infty)$  a fin de posicionar el instante de encendido del  $\text{ThP}_2$  durante el período de funcionamiento.

Poniendo un ejemplo si  $\infty = 0.5$  y  $U_F = 825$  v

Si nosotros no multiplicamos el paso de la expresión por  $(1 - \infty)$ , la cercanía del funcionamiento del comparador será en A. Esto trae como consecuencia que se permita el control del  $\text{ThP}_2$  inmediatamente después de la extinción del  $\text{ThE}$ . Nosotros encontramos la siguiente configuración - a 850 v. y no a 825 v.

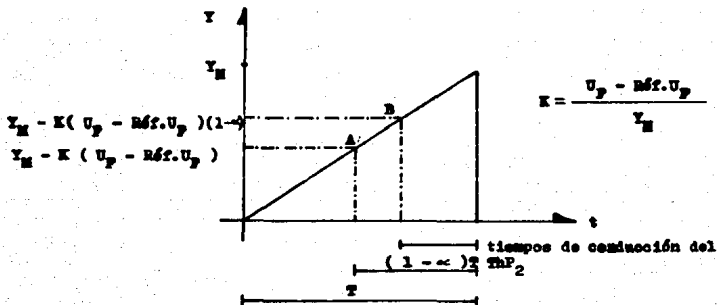


Fig. 4.22 Cambio de los instantes de control de  $\text{ThP}_2$

## - Síntesis

La utilización de las generatrices a excitación serie, para el frenado eléctrico por recuperación o frenado reostático, obedecen a las tensiones de estabilidad aparentemente alterando sus resultados. El par electromagnético se limita a las velocidades de rotación importantes y en el principio del frenado la corriente inducida ( $i$ ) no se establece en pasos instantáneos.

Dentro de las numerosas redes metropolitanas, el pilotaje automático regula la marcha de los trenes. Nosotros de bemos considerar que la conducción del sistema motriz está en función del equipo de tracción. El pilotaje automático demanda entonces en el principio del frenado, una débil desaceleración y aumenta la referencia del par electromagnético a medida que decrece la velocidad.

El par electromagnético alcanza el valor máximo de referencia para las velocidades del tren comprendidas entre 60 y 50 Km/hr. A partir de este intervalo la velocidad y hasta los 8 km/hr. las generatrices realizan el esfuerzo completo de frenado demandado.

### 4.3.2.4 PROBLEMAS EN LA COLOCACION DE LA GENERATRIZ DE EXCITACION SERIE

Se presenta en la fig. 4.23, la gráfica de las curvas de las tres características luego de que la generatriz proporciona en la red una tensión constante  $U_L$ :

- La fuerza electromotriz generada está en función de la corriente inducida  $i$ :  $e = f(i)$ .

- La tensión en los bornes de la generatriz  $U_G$  está en función de la corriente inducida  $i$ :  $U_G = f(i)$ .
- La suma de las caídas de tensión en los inducidos y en los inductores;  $V$  está en función de la corriente inducida  $i$ :  $V=f(i)$ .

Cada generatriz está equipada con polos auxiliares:

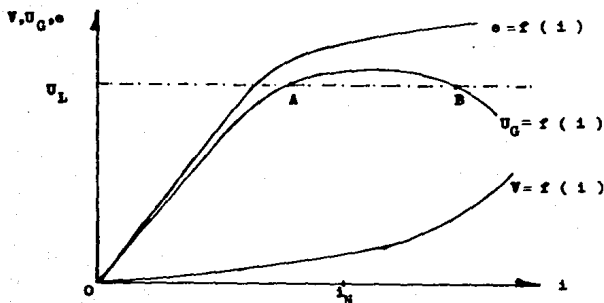


Fig. 4.23. Gráfica de las tres características de la generatriz que proporcionan en una red, una tensión constante  $U_L$ .

$$U_L: e = f(i), U_G = f(i), V = f(i).$$

Sólo hasta el punto de funcionamiento B ésta es estable, porque la característica  $U_G = f(i)$  es decreciente. - Pero el valor de la corriente en ese punto es superior a la intensidad de corriente nominal  $i_N$  por lo que se hace volver inaceptable el acoplamiento directo de una genera-

triz a excitación serie en una red a tensión constante.

Para la utilización de un alimentador de corriente, se puede establecer la generatriz a un punto de funcionamiento  $\lambda$ , tal que la corriente  $i$  sea menor o igual a  $i_N$ , que es la corriente nominal.

## CAPITULO V

## OPERACION DEL SISTEMA

- 5.1. CARACTERISTICAS DE LA FUENTE DE ENERGIA ELECTRICA A LA RED DEL SISTEMA Y EQUIPO AUTOMOTRIZ
  - 5.1.1 CARACTERISTICAS GENERALES DE LAS SUBESTACIONES DE RECTIFICACION (S.R.) QUE ALIMENTAN UNA ESTACION DE LA RED DEL SISTEMA
  - 5.1.2 PUESTO DE TRANSFORMACION (P.T.) O SUBESTACIONES DE TRANSFORMACION QUE ALIMENTAN UNA ESTACION DE LA RED DEL SISTEMA
  - 5.1.3 CARACTERISTICAS PRINCIPALES Y FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR ESTATICO CES
    - 5.1.3.1 EQUIPOS AUXILIARES DEL CES
    - 5.1.3.2 CARACTERISTICAS DEL CARGADOR DE BATERIAS
- 5.2. CARACTERISTICAS DEL EQUIPO AUTOMOTRIZ
  - 5.2.1 ENCENDIDO DEL TREN
  - 5.2.2 TRACCION - FRENADO
  - 5.2.3 OTRAS FUNCIONES DEL ESQUEMA DE POTENCIA
  - 5.2.4 EL CONTROL DE TRACCION FRENADO

### 5.1. CARACTERISTICAS DE LA FUENTE DE ENERGIA ELECTRICA A LA RED DEL SISTEMA Y EQUIPO AUTOMOTRIZ

La energía eléctrica utilizada por la red del metro de la Ciudad de México, es suministrada bajo forma de corriente trifásica en 85 K.V. por la C.F.E. a las subestaciones de A.T. (alta tensión) del puesto central de control (P.C.C.) ubicada en Buen Tono, (ver fig. 5.4.) acerca del diagrama general, por bloques de la distribución de la fuente de energía eléctrica a la red del sistema y equipo automotriz.

Esta alimentación de 85 K.V. proviene de las subestaciones de Nonoalco y Jamaica, pertenecientes a la C.F.E. y se lleva a cabo mediante dos cables subterráneos independientes entre sí, cables de tipo compresión, con aceite a presión y aislamiento de papel impregnado, con calibre de 800 MCM y capacidad de 1000 M.V.A.

Al alimentarse el sistema de estas dos subestaciones hay menos posibilidades de desenergización de las instalaciones del Metro, ya que las dos subestaciones (Nonoalco y Jamaica), forman parte del anillo de energía de 85.000 V., que circunda el Distrito Federal y se encuentran localizadas diametralmente opuestas, lo que da como resultado eléctrico que no se puedan cortar las dos alimentaciones del sistema.

Cada uno de los cables alimentadores de 85 K.V. tiene a su llegada a la subestación receptora del P.C.C. que - está integrada por dos subestaciones reductoras idénticas, - un interruptor general denominado A85 ó B85 que se encarga de aislar el cable correspondiente (ver fig. 5.1).

#### SUBESTACIONES DE ALTA TENSION Y DISTRIBUCION EN 15 K.V.

Cada cable de 85 K.V. alimenta una subestación de -- A.T. en el P.C.C. que asegura el suministro de energía a la mitad de las instalaciones del Sistema.

Sin embargo, en caso de falla de una de las dos subestaciones puede operarse un Seccionador Rotativo Manual -- (S.R.M.), que permite la alimentación del total de las instalaciones por un solo cable. Las dos subestaciones de A.T. y distribución del P.C.C. se les denomina "Subestación A" y "Subestación B".

Cada subestación de alta tensión y distribución del - P.C.C., está formada por dos transformadores de 37.5 M.V.A. (Mega Volts-Amperes), con una relación de transformación de 85/15 K.V., en conexión estrella-delta; con sus correspondientes seccionadores en el primario denominados: SA1, SA2, SB1 y SB2; y sus interruptores de salida en el secundario llamados LA1, LA2, LB1 y LB2.

Las dos salidas de 15 K.V. de cada subestación se pueden interconectar por medio de un enlace con su respectivo interruptor denominado EA y EB, las dos subestaciones tienen una capacidad de transformación total de 150 -- M.V.A., (ver figura 5.1).

Las cuatro salidas de 15 K.V. de las dos subestaciones de A.T. y distribución, alimentan cuatro buses de tracción y a dos buses de alumbrado, los cuales se encargan de alimentar las subestaciones de rectificación y las subestaciones de alumbrado y fuerza respectivamente.

La alimentación a cada bus (de tracción o de alumbrado), se puede hacer por cualquiera de sus extremos, cerrando el interruptor de ese lado. Las salidas de los cuatro transformadores están conectados a través de los dos enlaces por medio de su respectivo interruptor cada uno denominado EA y EB, y a los buses de 15 K.V. de manera tal, que la falla de un transformador puede compensarse a través de los interruptores automáticos existentes; por lo tanto cualquier transformador puede alimentar cualquier bus de 15 K.V. lo que permite que en caso de falla de tres transformadores, con uno solo de ellos se pueden alimentar los circuitos de seguridad del sistema.



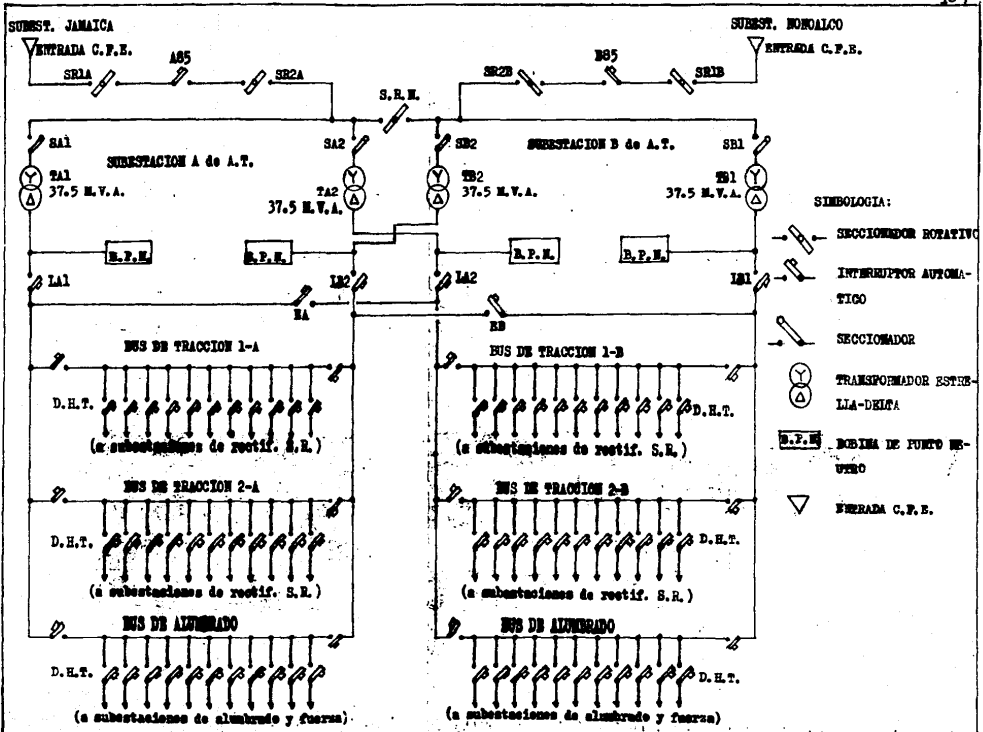


FIG. 5.1 Diagrama de las Subestaciones de A.T. y Distribución en 15 K.V. del P.C.C.

## DISYUNTOR DE ALTA TENSION (D.H.T.)

El disyuntor de alta tensión, es un interruptor automático que permite la alimentación, a partir de los diversos buses, a los puestos de rectificación y a los puestos de transformación del sistema. Estos interruptores se encuentran localizados en las instalaciones del P.C.C., y mediante el regulador del P.C.C. se tiene control sobre los interruptores (D.H.T.) a través de botones de telemando y señalizaciones de su posición (ver figura 5.1).

### 5.1.1 CARACTERISTICAS GENERALES DE LAS SUBESTACIONES DE RECTIFICACION (S.R.) QUE ALIMENTAN A UNA ESTACION DE LA RED DEL SISTEMA

Los cables alimentadores de 15 K.V. que alimentan las subestaciones de A.T. y distribución del P.C.C. salen en galerías subterráneas, a las cuales se unen ductos también subterráneos, por los que continúan los cables de 15 K.V.

Estos ductos se unen en sus extremos a los túneles más próximos de cada una de las líneas del Sistema y son transportados los cables en charolas, hasta la proximidad de las subestaciones donde se conectan. Para cada subestación de rectificación (S.R.), existe un cable alimentador de 15 K.V.

Las subestaciones de rectificación (S.R.), se encargan de transformar y rectificar la tensión media de 15 K.V. de c.a. en 750 v. de c.d. que es la tensión de trabajo de los trenes.

Los grupos o bloques que constituyen las Subestaciones de Rectificación son:

- a).- Bloque Seccionador; tiene como función principal aislar la Subestación y Rectificación (S.R.) con respecto al cable de 15 K.V. alimentador.
- b).- Bloque Transformador; tiene como función la de transformar la tensión recibida de 15 K.V. de c.a. en 540 V. de c.a.
- c).- Bloque Rectificador; tiene como función principal la de rectificar la corriente alterna en corriente continua de 750 V. de c.d.

Las subestaciones de rectificación, están constituidas esencialmente por un transformador y un rectificador de silicio de aproximadamente 2,500 K.W., con ventilación por aire.

La ubicación de las Subestaciones de Rectificación (S.R.), se hace en base a la caída de tensión máxima permisible, considerando que la puesta en fuera de servicio de una de ellas no afecta el mínimo de tensión y corriente

requerida para el movimiento de los trenes; ya que las dos adyacentes podrán con su capacidad absorber la sobrecarga existente. Tomando en cuenta los factores mencionados anteriormente para la distribución de las cargas a las que estarán sometidas cada una de las subestaciones de rectificación (S.R.), la distancia por caída de tensión y corriente entre cada subestación es de 1.5 Km. aproximadamente.

Existen dos tipos de subestaciones de rectificación (S.R.), que alimentan la red del sistema que son; las subestaciones "A" y "B". La subestación "A", que tiene un Contactor de Seccionamiento (C.S.), se denomina de "Alimentación en Seccionamiento" y la subestación "B", llamada de "Alimentación en T".

Las subestaciones de rectificación (S.R.), que tienen su alimentación en seccionamiento, básicamente se encuentran constituidas en forma idéntica a las subestaciones que tienen su alimentación en T; con la única excepción de que en la subestación tipo "A" el Disyuntor Ultra Rápido (D.U.R.), alimenta una de las zonas directamente y la zona adyacente se alimenta por el contactor de Seccionamiento, como se muestra en la figura 5.2.

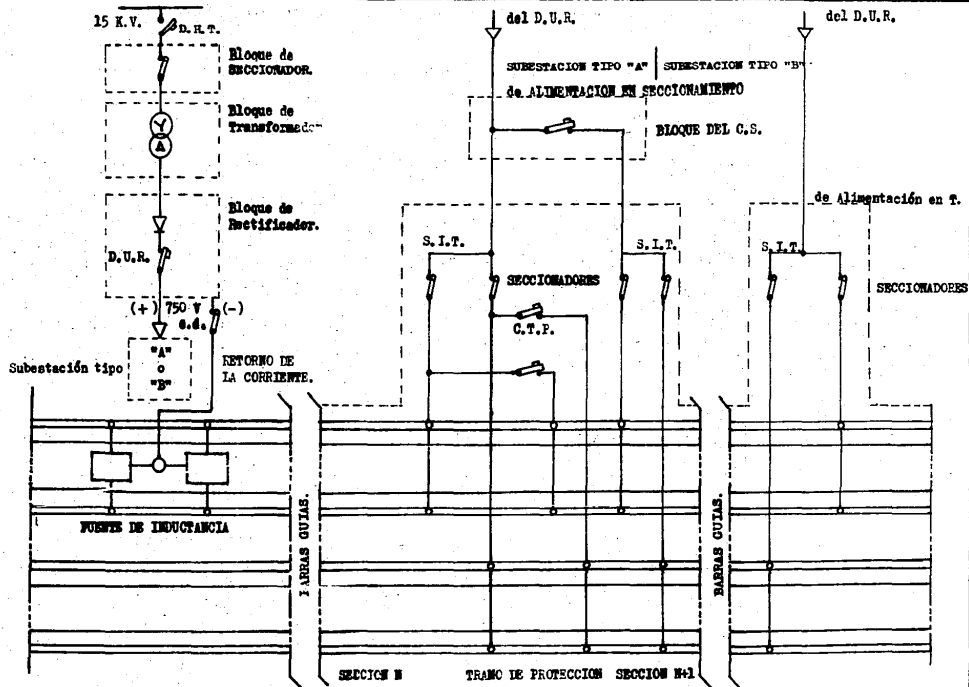


FIG. 5.2 Diagrama de los tipos de Subestaciones de Rectificación (S.R.), "A" y "B".

## DISYUNTOR ULTRA RAPIDO (D.U.R.)

El Disyuntor Ultra Rápido, es un interruptor automático que permite la alimentación del puesto de rectificación a los cableados que llegan a las barras gúfas. Este interruptor (D.U.R.), se encuentra localizado dentro de las Subestaciones de Rectificación (S.R.), y trabaja con un voltaje aplicado de 750 V. de c.d., no teniendo ningún control local.

El interruptor automático ultra rápido (D.U.R.), es común a las dos vías; de manera que las dos vías se encuentran en paralelo a pesar de que el D.U.R. esté abierto. En las Subestaciones de Rectificación (S.R.), que se alimentan en seccionamiento, los D.U.R. alimentan una de las zonas directamente y la zona adyacente se alimenta a través del contactor de seccionamiento (C.S.).

El retorno de la corriente a las Subestaciones de Rectificación (S.R.), se efectúa por los rieles de seguridad, los cuales logran su continuidad eléctrica a través de los Puentes de Inductancia.

## CONTACTOR DE SECCIONAMIENTO (C.S.)

El Contactor de Seccionamiento (C.S.), es un interruptor automático que permite la continuidad eléctrica entre -

las zonas de una línea de la red del sistema. Trabaja con un voltaje aplicado de 750 v. de c.d. y se encuentra ubicado dentro de las Subestaciones de Rectificación (S.R.), de alimentación en seccionamiento en la frontera de zonas. El P.C.C. tiene un botón de control de apertura y cierre del contactor de seccionamiento.

#### CONTACTOR DE TRAMO DE PROTECCION (C.T.P.)

El Contactor de Tramo de Protección (C.T.P.), permite la alimentación eléctrica de los diversos tramos de protección en la frontera de zonas.

Se encuentra ubicado dentro de cámaras en el mismo -tunel, y su apertura y cierre está subordinada a la operación del Contactor de Seccionamiento (C.S.). El P.C.C. só lo tiene control de su posición, existiendo un contactor -de tramo de protección (C.T.P.) por vía, (ver figura 5.2).

#### SECCIONADOR DE AISLAMIENTO TELEMANDO (S.I.T.)

El Seccionador de Aislamiento Telemando (S.I.T.), permite establecer la continuidad eléctrica entre las secciones de una zona determinada; se encuentran ubicados dentro de los nichos en el tunel, sobre cables que conectan dos -seccionadores adyacentes. Estos seccionadores (S.I.T.), es tán conectados en serie con unos seccionadores manuales, a razón de un seccionador por vía y por sección, (ver fig. 5.2).

Los seccionadores de aislamiento telemando son controlados a distancia por el P.C.C. además, se cuenta con un control eléctrico manual localizado junto al interruptor para efectuar algún mantenimiento. Además permite -- aislar una sección de una zona, en la cual se pueda presentar un incidente con respecto a la alimentación de tracción.

5.1.2 PUESTOS DE TRANSFORMACION (P.T.) O SUBESTACIONES DE TRANSFORMACION QUE ALIMENTAN UNA ESTACION DE LA RED DEL SISTEMA

Las cuatro salidas de 15 K.V. de las subestaciones de A.T. y distribución en 15 K.V., que alimentan a cuatro buses de tracción y a dos buses de alumbrado, y que se encarga de alimentar las subestaciones de Rectificación (S.R.) y Subestaciones de Transformación o Puestos de Transformación (P.T.) respectivamente, son llevados por medio de ductos hacia el tunel, sitio en el cual estas cuatro salidas o cables alimentadores continúan por un lado y los otros -- dos en el sentido opuesto a la línea de la red del sistema.

Los cables que alimentan los buses de alumbrado de la Subestación de A.T. y Distribución en 15 K.V. del P.C.C. son llamados cables de fuerza y alumbrado, y se encuentran protegidos por un interruptor automático denominado Disyuntor de Alta Tensión (D.H.T.), localizado en la misma Subestación.



Con la llegada de dos cables a cada estación de la red del sistema (uno por vía) son alimentadas dos Subestaciones de Transformación o Puestos de Transformación (P.T.), las cuales se encargan de transformar la tensión de 15 K.V. de c.a. en 220 y 127 v. de c.a. destinada a alimentar los equipos instalados en las estaciones de la red del sistema.

Los equipos que alimentan las Subestaciones de Transformación o Puestos de Transformación (P.T.) son:

a).- Los armarios de distribución tipo "N" (uno por vía), mismos que a su vez alimentan básicamente:

- Escaleras Mecánicas (E.M.).
- Bombas de extracción de agua (S.B.).
- Ventilación (Extractores de Aire) (E.A.).
- Armario de señalización en vías (N-V).
- Alumbrado Normal (A.N.).
- Armario de contactores de acoplamiento tipo "P" (Armario "P").

b).- Los armarios de contactores de acoplamiento tipo "P" (Armario "P"), alimentan los siguientes equipos:

- Equipo de Telemando (L.T.).
- Ciertos equipos de la Subestación de Rectificación (S.R.) más cercana; así como Equipos de Tracción (E.T.) y Motores de Aparatos de Vía cercanos a la estación.

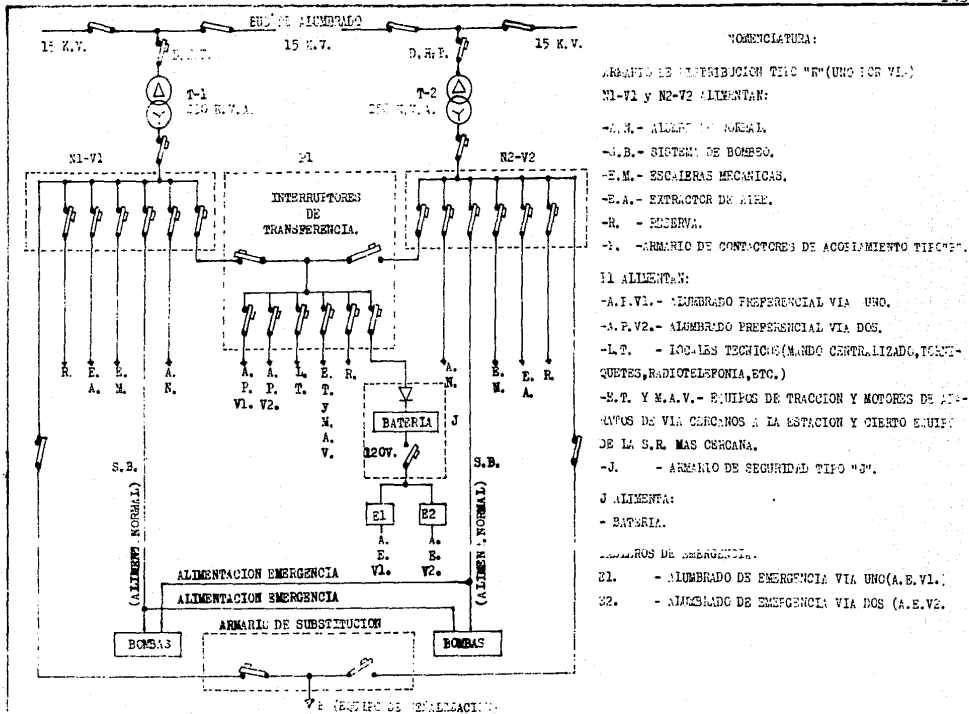


Fig. 5.3 Diagrama de un Punto de TRANSFORMACION (E. I.) a Subestacion de Transformacion.

- Alumbrado Preferencial ambas vías (A.P. V1 ó V2).
- Armario de seguridad tipo "J", que comprende una batería con una capacidad de trabajo de tres horas, un dispositivo que permite cargarla en menos de tres horas, y un interruptor que sólo cierra en caso de ausencia total de corriente alterna, para alimentar los centros de carga E1 y E2 - que alimenta los tableros del alumbrado de emergencia en la vía uno y tablero de alumbrado de emergencia en la vía dos.

Las Subestaciones de Transformación o Puestos de -- Transformación (P.T.), están formadas por dos transformadores de 250 K.V.A., con una relación de transformación de -- 15 K.V./220 - 127 V. de c.a. y conexión delta-estrella, -- (ver figura 5.3).

#### PUESTO CENTRAL DE CONTROL (P.C.C.)

La parte maestra del sistema del Metro de la Ciudad de México está en el Puesto Central de Control (P.C.C.), -- que es en verdad el cerebro que gobierna a este organismo -- cibernético que para los simples usuarios se muestra tan cotidiano, normal y tan integrado a sus necesidades comunes -- de traslado. El puesto Central de Control, vigila la regulación de los trenes en su marcha por las líneas, para con-

centrar la comunicación entre las estaciones y los trayectos del tren con los vagones, los conductores de los trenes y los jefes de estación. En el P.C.C. se detecta cualquier movimiento o anomalías que se presenten; tiene un control óptico en donde se representa todas las líneas con sus estaciones, vías principales, vías secundarias, señales de vía, línea indicadora de presencia de tensión en barra guía, control de subestaciones, en fin todos los elementos del sistema con un tablero de alarmas en el que se señala cualquier falla o emergencia.

Todo el P.C.C. está íntimamente ligado a la seguridad de cada vagón de los conductores o inspectores de línea, siendo capaz de localizar gran variedad de fallas. Si la avería es de control se enciende una lámpara de alarma indicando el equipo que tiene problema, para proceder de inmediato a la reparación.

Como complemento tiene el pupitre regulador en el cual se encuentran los botones de itinerario para efectuar movimientos de los aparatos de vía; hay una programación de tráfico de línea que controla las entradas y salidas de los trenes en terminales. El control óptico va siguiendo tramo a tramo el tren, a medida que avanza.

El centro de comunicaciones complementario al sis-

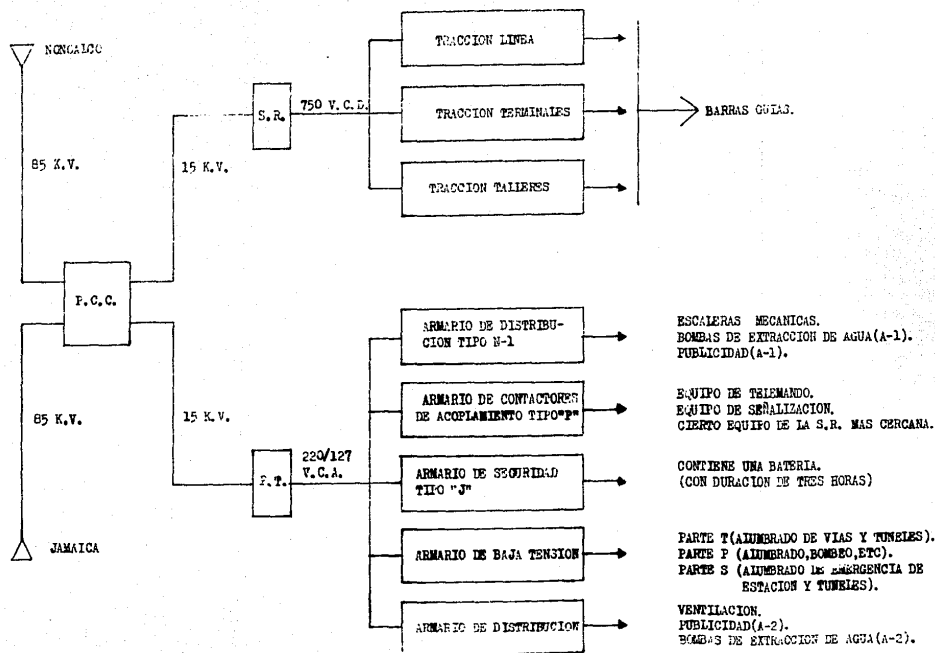


FIG. 5.4 Diagrama general por bloques de la distribución de la fuente de energía eléctrica a la red del sistema y equipo autoconstruido.

tema P.C.C. se integra por teléfonos de comunicación directa y de comunicación interna que puede establecerse de inmediato con la cruz roja, los bomberos, la policía con las taquillas y demás localidades del metro. Si el conductor llega a rebasar la velocidad permitida en líneas o franquea una señal de alto total, el tren se detendrá inmediatamente debiendo avanzar sólo con la autorización del P.C.C.

La señalización está hecha de tal manera que conforme el tren avanza va dejando dos señales de alto tras él -- para evitar cualquier alcance con otro tren.

La distribución de la corriente de tracción en línea, se efectúa con una tensión de 750v c.d. aplicada a la barra guía, las cuales son normalmente alimentadas en paralelo. Las barras guías de una línea son divididas en zonas y éstas a su vez en secciones. En situación normal, las secciones y por consecuencia las zonas, están en continuidad -- eléctrica a lo largo de la línea. Esta continuidad es realizada por los contactores de seccionamiento y entre las -- secciones por los seccionadores de aislamiento telemando. -- La frontera entre las secciones se llama "seccionamiento", -- el cual tiene como finalidad evitar el puente por un tren -- de una sección alimentada a una sección privada de corriente. Para ese efecto lleva un tramo de protección.

Los tramos de protección son alimentados normalmente por unos contactores auxiliares, (C.T.P.), uno por vía denominados contactores de tramo de protección. Estos contactores permiten la alimentación eléctrica de los diversos tramos de protección localizados en la frontera de zonas. Se encuentran ubicados dentro de cámaras en el mismo túnel y su apertura y cierre está subordinada a la operación del contactor de seccionamiento.

#### 5.1.3 CARACTERISTICAS PRINCIPALES Y FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO CES

El convertidor estático CES, se alimenta de la tensión de tracción y suministra para los servicios auxiliares del tren en baja tensión, en forma de corriente alterna monofásica, y en corriente continua baja tensión, Tiene las características siguientes:

Alimentación : 600 - 900 V.C.C.

Tensión Nominal : 750 V.C.C.

- Salida de Corriente Alterna:

Potencia : 17.5 K.V.A.

Tensión : 220 V. Monofásica

Regulación de tensión :  $\pm$  5%

Frecuencia : 60 Hz

Estabilidad de Frecuencia :  $\pm$  5%

Forma de onda : Senoidal

- Distorsión forma de onda : 10% máximo  
 Capacidad de sobrecarga : 40%  
 - Salida corriente continua (C.C.):
- Potencia : 4.4 K.W.  
 Tensión : 75 V. (ajustable de 72 a 80)  
 Regulación : 12%  
 Capacidad sobrecarga : 23%

La potencia nominal es asegurada para una tensión de tracción mayor de 600 Volts.

El convertidor estático CES básicamente consta de un filtro de entrada de alta tensión, un transformador devoltador que transforma la alta tensión variable y filtrada en baja tensión 300 V.C.D. constante y filtrada, un ondulator que transforma la corriente 300V en 220 V, 60 Hz y un cargador de batería.

La figura 5.5 muestra un diagrama de bloques del convertidor estático CES.

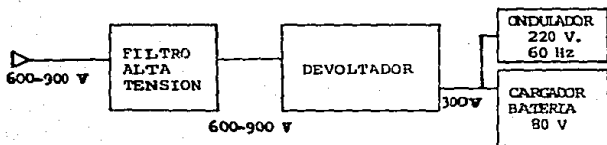


Fig. 5.5 Diagrama de Bloques del Convertidor Estático CES.



Por funcionar a base de elementos estáticos, está - casi libre de mantenimiento, excepto por la limpieza a los ductos de ventilación y mantenimiento al motor del ventilador.

El convertidor estático alimenta los circuitos auxiliares siguientes (ver fig. 5.6)

- Alumbrado normal, con una carga aproximada de 4.4 K.V.A.
- Ventilación pasajeros, con una carga de 2.6 K.V.A.
- Ventilación equipos de tracción "Chopper", con una carga de 3.2 K.V.A.
- Ventilación PA, con una carga de 0.50 K.V.A. la carga total de 14.5 K.V.A. deja margen de 1.25 K.V.A.

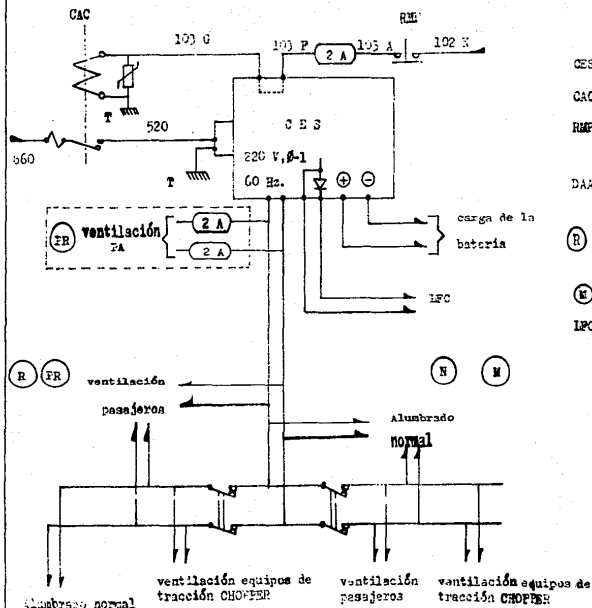
A partir de su salida de corriente directa:

- Carga de batería, con una carga de 4.4 K.V.A. repartidos entre corriente de carga a la batería y alimentación a los circuitos de baja tensión.

#### 5.1.3.1 EQUIPOS AUXILIARES DEL CES

El equipo eléctrico auxiliar del CES comprende (ver fig. 5.6):

- Un dispositivo de mando y de arranque (relevador RMP y contactor CAC).



## NOMENCLATURA:

- CES .-CONVERTIDOR ESTÁTICO  
 CAC .-CONTACTOR DE ALIMENTACION AL CES  
 RMP .-RELEVADOR DE MANTENIMIENTO DE LA PREPARACION  
 DAA 1,2 .-DISYUNTOR DE ALIMENTACION DE CORRIENTE ALTERNA UNO Y DOS  
 (R) (FR) .-CARROS REMOLQUE (PA "PILOTAJE AUTOMÁTICO")  
 (M) (N) .-CARRIL MOTRIZ CON CABINA Y SIN CABINA  
 IPC .-LAMPARA DE FALLA DEL CONVERTIDOR

FIG. 5.6 Diagrama de Alimentación a circuitos Auxiliares del "CES"

- Los interruptores automáticos de protección de los circuitos de distribución de corriente alterna por el CES (DAA1 DAA2).

Condiciones necesarias de funcionamiento del CES:

- Circuito A.T. hilo (660) bajo tensión.
- Preparación del material efectivo.
- Batería con carga suficiente.

Al arranque, el contactor electromagnético de alimentación del convertidor CAC, es alimentado por el circuito que comprende un contactor de relevador de mantenimiento, -- preparación RMP a través del circuito 102 K - 103 A - 103 F - 103 G. (El puente 103 F- 103 G está siempre establecido dentro del CES en condiciones normales). El CAC se establece y cierra su contactor 660-520 que establece la corriente de alta tensión en el CES, metiéndolo en servicio.

Si la tensión de la batería es inferior a 35 V. el CES no podrá entrar en servicio.

Si la tensión de la batería es suficiente al principio del arranque pero se abate al subir la corriente a 20 A, el convertidor se para.

El convertidor puede proveer un 40% de la corriente nominal durante el arranque de los motores alimentados en -

220 V, 60 HZ, esto significa una corriente de 114 Amp. eficaces.

Si la carga exige un nivel de corriente superior al mencionado, el convertidor se para, espera un segundo y vuelve a arrancar, si la condición persiste, el paro se repite hasta que el tercer paro es definitivo.

El paro del convertidor se realiza en los siguientes casos:

- Anulación de la preparación del material : El hilo 102K ya no es alimentado y el contactor CAC se desenergiza parando al CES.
- Maniobra de un conmutador escobillas.
- Falta de alta tensión.

Si la alta tensión se interrumpe por más de 4 milisegundos, el convertidor se para y se vuelve a restablecer, un segundo después de restablecida la alta tensión (si la interrupción es menor de 4 milisegundos). El CES mantiene su salida, debido a la energía almacenada en el filtro de entrada. (Fig. 5.7).

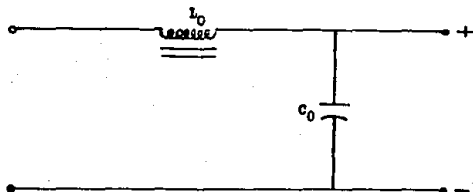


Fig. 5.7 Filtro de entrada de alta tensión.

Como el convertidor produce por sí mismo todas sus energías internas, se puede presentar una interrupción de la batería parando todo su funcionamiento, sin embargo a la siguiente interrupción de alta tensión, el convertidor ya no podrá volver a arrancar.

- Cuando la carga es cortada bruscamente, se produce una variación de + 25% sobre la tensión de salida.
- Estando el tren no preparado, y si la batería no se aísla, el convertidor absorbe una corriente residual permanentemente de 20 mA.

El filtro de alta tensión se compone de una bobina  $L_0$  y un capacitor  $C_0$  (fig.5.7), este filtro protege contra los picos de alta tensión en la línea y aliza la corriente tomada de la línea por el convertidor.

El transformador devoltador es un conjunto ondulator-

rectificador - filtro baja tensión que transforma la corriente 600-300 V en 300 V constante y galvánicamente aislada de la alta tensión.

El ondulador-transformador opera a 720 Hz con ondas -- rectangulares.

El ondulador 60 Hz, 220 V. La corriente 220 V es obtenida por conmutación de la de 300 V (para una tensión de - 220 V eficaz, la cima de la senosoidal es de 300 V).

#### 5.1.3.2 CARACTERISTICAS DEL CARGADOR DE BATERIAS

Las baterías están instaladas en los remolques "R" y "PR". El conmutador de transferencia de la batería tiene - cuatro posiciones, lo cual permite abatir ciertos defectos -- de los circuitos de alimentación en B.T.

Las características de la batería son:

- Tipo: KPL-65 Cadmio-Níquel, electrolítico básico a base de hidróxido de carburo.
- Capacidad: 50 celdas, 65 Amp/ Hr, 75 Volts.
- Uso.- Relevadores, ventilación forzada a pasajeros, iluminación de emergencia, anuncio a pasajeros, señalización.

## 5.2 CARACTERISTICAS DEL EQUIPO AUTOMOTRIZ

Como ya se dijo antes, en el punto 2.5 capítulo II; el material MP-82 permite la formación de trenes de 6 a 9 ca rros, comprendiendo cuatro tipos (M, N, R y - PR).

La continuidad de los circuitos de baja tensión de corriente continua y alterna, es asegurada en toda la longitud de un tren, por seis líneas de tren formadas por cables multiconductores unidos entre los carros, por acoplado res.

- Línea S: Seguridad, señalización.
- Línea T: Control del tren.
- Línea C: Conducción.
- Línea P: Pilotaje automático
- Línea A: Anuncio viajeros y varios.
- Línea B: Alternativa, transferencia, batería.

Cada uno de los acopladores: S, T, C, A y B compre n de 19 alambres de 2.5 mm<sup>2</sup>; el acoplador P está formado por cables blindados; y tiene una función particular.

La continuidad de los circuitos de alta tensión, entre remolque y motriz, está asegurada por un acoplador -- que comprende siete alambres de 6 mm<sup>2</sup>; este es el acopla dor H.

Los acopladores móviles están conectados a acopladores fijos o de base, repartidos en las caras anterior y posterior de los coches, de modo que los acopladores móviles no se crucen.

Los remolques aseguran la alimentación de las motrices, con corriente continua (baja tensión) y con corriente alterna por las líneas del tren.

### 5.2.1 ENCENDIDO DEL TREN

La alimentación en baja tensión constituye la preparación de todo el equipo automotriz (todo el tren), y se realiza:

1.- Apoyándose sobre uno de los tres botones-pulsadores de "encendido" (EN), botón de preparación de todo el equipo automotriz, situado; uno en el tabique de la cabina y los otros dos a ambos lados del extremo delantero del chasis de las motrices (M), cuando se establece la alimentación de alta tensión.

2.- O apoyándose sobre uno de los tres botones-pulsadores (EN), cuando no se dispone de la alimentación en alta tensión; esto con la condición de haber puesto previamente el conmutador TI en una de las tres posiciones de servicio.



Estando establecida la corriente de alta tensión, el relevador **RMP** (relevador de mantenimiento de la preparación) es conectado poniendo el circuito 2 a tierra; así pues el relevador de preparación del equipo automotriz -- (RPM), es alimentado por el circuito 101-1A-"EN"-1-2-T -- que se establece al accionar el botón "EN".

El contactor de preparación del sistema (CPM) es alimentado por el intermedio del contactor de trabajo del relevador RPM: a través de los circuitos 100B-100F y asegurando la alimentación del conductor 102 (por circuito 100B); así como la alimentación a todos los circuitos de baja tensión y además establece el automantenimiento del relevador de preparación del equipo automotriz (RPM) a través de los circuitos 102-103E-1-2 y T, esto se puede observar en la - fig. 5.8. (Alimentación a circuitos de B.T. ; control de preparación del material ó equipo automotriz)

El conductor 101 es alimentado por la tensión de la - batería a través de los circuitos 100-100B. En este momento el tren queda encendido.

En la cabina de conducción se toman los controles -- siguientes con:

- El conmutador de conducción "C".
- El conmutador de sentido de marcha "VR".

- El conmutador de control de los disyuntores "D".

La protección del equipo de tracción y frenado está - asegurada principalmente por dos disyuntores D.E.T. y D.I.M.

Cuatro líneas de tren (11,10 y 12.8) permiten la subida de los disyuntores, la inversión del sentido de marcha y las pruebas de baja frecuencia (en estas pruebas la alta - tensión está presente).

Dichas líneas del tren son las siguientes:

Línea 8 : control de los disyuntores.

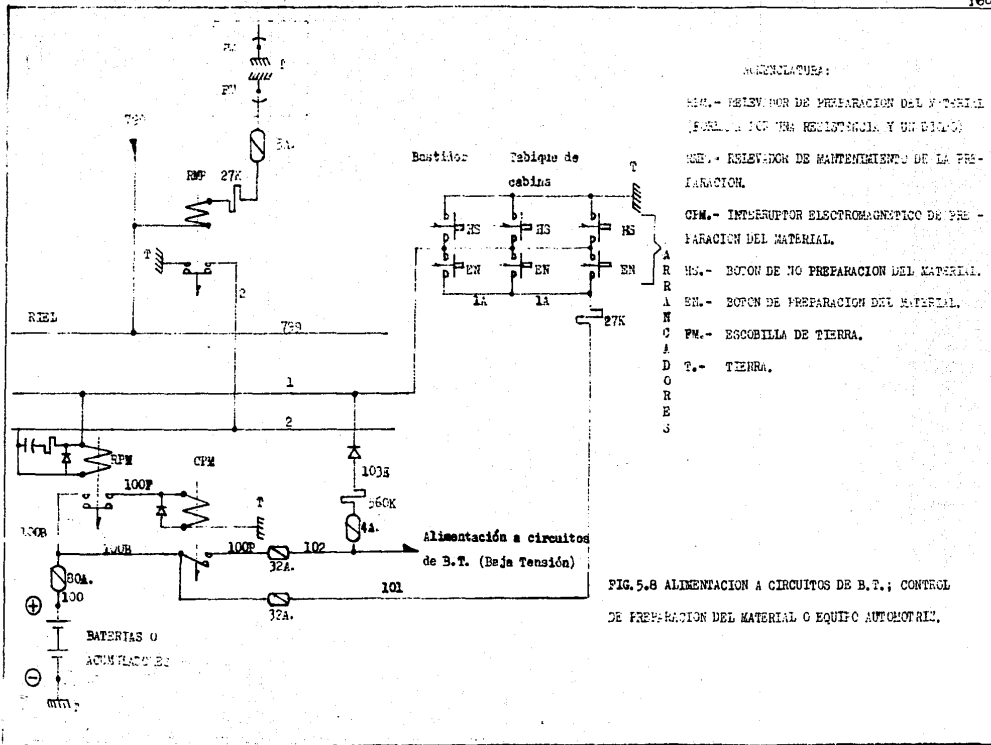
Línea 12: pruebas de baja frecuencia.

Estas dos líneas del tren son tales que no pueden ponerse baja tensión simultáneamente.

El conmutador de control de los disyuntores (D) que - controla estas líneas en cabina de conducción de la motriz (M); posee tres posiciones: una posición D (línea 8 alimentada), una posición de reposo (ninguna línea alimentada), y una posición de ensayo (línea 12 alimentada).

Líneas 10 y 11: control del conmutador de sentido - de marcha (VR), para atrás y para adelante.

Lo mismo que las líneas 8 y 12, las líneas 10 y 11 -



no pueden ponerse bajo tensión simultáneamente.

El conmutador (VR), que controla estas líneas del -- tren, posee tres posiciones: una posición delantera (línea 11 alimentada), una posición de reposo (ninguna línea alimentada), y una posición trasera (línea 10 alimentada).

El conmutador de conducción C, posee 4 posiciones: CM (conducción manual), CMC (conducción manual controlada), - PA (pilotaje automático) y HS (fuera de servicio).

El control simultáneo de varios tipos de conducciones es imposible; ya que sólo el tipo de control que se pone - en servicio por medio del conmutador elegido, es el que se activa.

Posteriormente al verse definido el sentido de marcha, el tipo de prueba y la conducción deseada; el conductor -- procede a mover el tren o a efectuar las pruebas de baja -- frecuencia.

Si la conducción tomada es P.A. el conductor sólo -- tendrá que cerrar las puertas y accionar el relevador de -- sustitución de hombre muerto (RSH) que se encuentra en el manipulador y automáticamente el tren empieza a avanzar. El grado de tracción es tomado por el tapiz que se encuentra - sobre la barra gufa mediante unos captadores de alta frecuen-

cia que están colocados en el remolque (PR) si la conducción es de cualquier otro tipo el conductor será encargado de seleccionar el grado de tracción.

#### 5.2.2 TRACCION - FRENADO

Cada automotriz M 6 N, posee cuatro motores serie a razón de 2 motores por bogie. La corriente de tracción está distribuida con una tensión nominal de 750 V.

Los motores de excitación serie de un bogie están -- siempre acoplados en serie, por consiguiente cada uno de ellos soporta como máximo la mitad de la tensión nominal -- de 750v.

Los cuatro motores de una misma automotriz se controlan por el mismo circuito de control local alimentado en -- baja tensión.

La función se realiza por un Chopper de tres fases -- (ver fig. 5.9). Las tres fases se reúnen en un punto común: hilo 720, el cual se reúne después con los motores. Con esas tres fases cuyo funcionamiento está defasado eléctricamente en  $1/3$ , el coeficiente de ondulación en los -- motores es mínimo.

Cada fase comprende:

- El tiristor principal o tiristor de marcha ThP.
- El tiristor de inversión ThI.
- El tiristor de paro o de extinción The.
- El diodo de vía libre D.

Cada uno de estos componentes es de hecho un conjunto de 2 componentes montados en serie de manera a tener una buena seguridad en el mantenimiento de la tensión.

El equilibrio de los 2 componentes en serie asegura el funcionamiento estático por resistencias equilibradas y el funcionamiento dinámico por circuitos RC de protección.

En serie con cada grupo tiristor se encuentra una inductancia saturable ( $\mu, \gamma, \lambda$ ) permiten controlar la velocidad de subida de la corriente en los tiristores.

Encontramos también, asociados con cada fase:

- Una inductancia de alizamiento L.
- Un tiristor de frenado reostático ThFR.
- Un reostato frenado RH.

En tracción el Chopper funciona como "Chopper Serie", reductor de tensión.

En frenado, el Chopper funciona como "Chopper deriva

ción", elevador de tensión.

Sea en funcionamiento "receptor", o en funcionamiento "generador", los motores están siempre con excitación - serie.

Cada fase comprende su circuito de extinción. Además de los tiristores de paro y de inversión ya mencionados, el circuito comprende un condensador de extinción "C", una inductancia saturable de inversión " $\lambda$ " y la resistencia de mantenimiento de la carga del condensador "RCM".

La conmutación tracción-frenado se realiza por los diodos D4 y los tiristores Th4, protegidos durante la puesta bajo tensión por el circuito RC de protección. En frenado, la corriente de los inducidos de los motores está en sentido inverso del que existe en tracción, mientras que la corriente en los inductores está siempre en el mismo sentido.

Por otra parte, la disposición de los componentes del puente (tracción-frenado está provisto para que los inductores  $L_2$  de los motores de una bogie estén "cruzados" en frenado con los inducidos de los motores del otro bogie, con objeto de asegurar una buena estabilidad de las tensiones de los motores en frenado (esto se puede observar en la fig. 5.9).

### 5.2.3 OTRAS FUNCIONES DEL ESQUEMA DE POTENCIA

- El fusible de tracción F.T. está previsto para cortar - intensidades muy fuertes y compuesto de dos fusibles uni tarios en derivación.
- El disyuntor del equipo de tracción D. E.T. de tipo ultrarápido, está previsto para cortar rápidamente todas las corrientes de falla.
- El disyuntor de aislamiento de los motores D.I.M. del mismo tipo que el anterior, este disyuntor está previsto para interrumpir el circuito de los motores en frenado y asegurar una protección óptima de éstos.
- El relevador QDI (relevador diferencial de intensidad) compuesto de dos bobinas interviene cuando la corriente entrante no es la misma que la corriente saliente.
- Los relevadores QSI y QSF ~~de~~ sobrecarga de intensidad intervienen; el primero para la línea de alimentación (a la cabeza del esquema) y el segundo para el circuito de los motores en frenado.
- El relevador QCI controla la ausencia efectiva de corriente cuando se pide la marcha con motores parados.
- El relevador QDM compuesto de dos bobinas interviene cuando las corrientes de los motores siguen siendo muy diferentes de un bogie al otro.
- El diodo decrestador D<sub>5</sub> fija el potencial del punto 720



en  $U_L$  a la abertura del disyuntor DIM.

Filtro asociado al "CHOPPER", se realiza por un filtro constituido:

- De una inductancia de filtro  $L_0$ .
- De un condensador de filtro  $C_0$ .

Asociado con este filtro, encontramos:

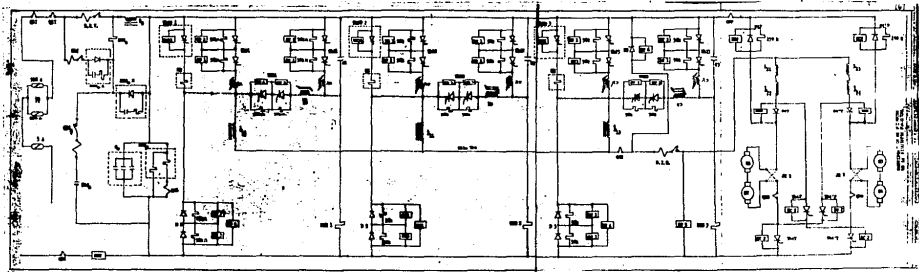
- El contactor de precarga del filtro  $CLC$  y la resistencia de carga del filtro  $RCC_0$ .

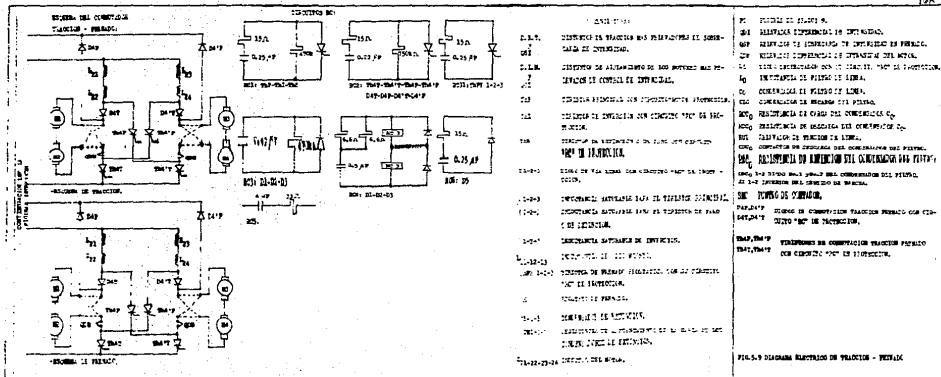
Dichos subconjuntos permiten cargar al condensador  $C_0$  antes de que el disyuntor D.E.T. se cierra.

- La resistencia de descarga del filtro  $RDC_0$ .
- El relevador de tensión de línea  $RUL$  mide la tensión de carga del filtro.
- El contactor de descarga del filtro  $CDC_0$ .
- La resistencia de extinción del filtro  $RECO$ .
- Un conjunto de dos diodos de bloqueo del filtro  $DBC_0$  1 y 2.

Estos dos diodos son útiles en el caso del funcionamiento en frenado reostático, con D.E.T. abierto.

En efecto, en tal caso el D.E.T. está abierto y el  $CLC$  cerrado. El diodo  $ABC_0$  impide que la corriente sea enviada de nuevo a la línea. Además en tal caso de funcionamiento, cualquier subida de tensión que pudiera producir-





se en los bornes del condensador es absorbida por la resistencia  $REC_0$  dado que el contactor  $CDC_0$  está también cerrado. El diodo  $DBC_0$  evita cuando  $CLC$  se cierra que la línea sea puesta directamente a los bornes del condensador y a la vez permite que la resistencia  $REC_0$  desempeñe plenamente su papel de "receptor" si la tensión de  $C_0$  rebasa la tensión de línea.

Invertidor en sentido de marcha.

Esta función la realiza el inversor  $JX$  que invierte el sentido de paso de la corriente en los inducidos de los motores (los inductores siempre son recorridos por la corriente en el mismo sentido).

El Shunt  $SHC$  de calibre 500 A-0, le permite la eventual utilización de un contador previsto para contar separadamente la fase tracción y la fase frenado.

#### 5.2.4 EL CONTROL DE TRACCION FRENADO

El control tracción-frenado se efectúa mediante la alimentación de las Líneas de tren 13,19 y 20, y la alimentación del par "mando continuo" 21-22.

Además, el par 60-60A que traduce la autorización de recuperar, permite caer el disyuntor  $D.E.f.$  en frenado

e imponer el frenado reostático.

La función de las líneas de tren 13, 19 y 20 es la siguiente:

- Línea de tren 13 : Control frenado.
- Línea de tren 19 : Control tracción.
- Línea de tren 20 : Control tracción superior a T1.

Si la línea de tren 19 está alimentada mientras la línea de tren 20 no lo está, la tracción está limitada a T1.

Si la línea de tren 19 está ausente y la línea de tren 20 está accidentalmente presente, no hay tracción; se necesita en todos los casos la línea 19 alimentada.

El "control de tracción" entra a la lógica, por el hilo 40JE: circuito 129, +60V lógico, 401, 401A, 401B, 403, 403B y 403E. Para que la tracción sea posible es preciso:

- Que el disyuntor DET esté cerrado.
- Que el motor del ventilador del Chopper esté controlado CMV1 y que el motor funcione RCV1.
- Que el frenado esté terminado: relevador RFA caído.
- Que el frenado del tren no esté pedido: relevador RF1 caído.
- Que no se esté en pruebas de baja frecuencia conmutador KEB-normal.
- Que la tracción esté pedida por el manipulador (relevador RTR cerrado).

- Corriente motor pedida: 175 A aproximadamente.
- Tensión motor pedida : 20% de la tensión de línea.
- La corriente del mando continuo sea superior a 76 mA aproximadamente.

Esta corriente atraviesa, el enrollamiento de mando de un amplificador magnético. Una tensión analógica proporcional a la corriente de mando continuo va entonces a entrar en el gabinete de la lógica, y unas referencias IM y UM (que son tensión y corriente del motor) van a ser emitidas proporcionalmente a la corriente del mando continuo (que va hasta 100 mA); y por consiguiente al pedido del manipulador (o del P.A.).

Estas referencias van a variar de 0.2 UL a 0.9 UL aproximadamente para la tensión UM del motor y de unos 175 A a unos 550 A para la corriente IM del motor concretamente, las referencias UM e IM para las diferentes comparaciones; en T1: 0.2 UL y 175 A en T2:0.5 UL y 310 A, en T3:0.65 UL y 550 A, en T4 y T5: 0.9 UL y 550 A.

Control de frenado eléctrico y neumático.

El "mando frenado eléctrico" entra en la lógica a través de la alimentación del hilo (402 A); circuito 129,60 V lógico, 401, 401A, 401B, KIF, 401C, 401D, 401E, 402 y 402A.

Para que el frenado eléctrico sea posible, se necesita (hilo 402A puesto a + 60 V lógico) :

- Que el disyuntor DET esté cerrado o que se esté en frenado reostático con DET caído.
- Que el motor del ventilador del Chopper esté en operación (CMV1 y RCV1)
- Que el conmutador KIF esté en posición "normal".
- Que el motor del ventilador de reostato esté en operación (CMV2 y RCV2)
- Que la tracción esté terminada: RTA caído.
- Que el frenado del tren esté pedido: RF1 cerrado.

Cuando el manipulador (o el P.A) está en frenado el hilo 402A está a +60V porque la línea 13 energiza el relevador RF1 (fig. 5.10); tal situación provoca las acciones siguientes por parte de la lógica.

- Subida (energización) del relevador RFA (relevador de frenado autorizado).
- Visualización de la referencia de intensidad máxima en frenado (sea aproximadamente 440 A).

La subida del relevador RFA provoca además el funcionamiento de los motores en generador (frenado eléctrico). Por otra parte, el frenado propiamente dicho y en particular el frenado neumático interviene en cuanto la corriente de control continuo, está inferior a 62.5m A aproximadamente (manipulador en F1 y más allá en frenado).

En efecto, hay elaboración de una referencia de par - de frenado, la cual da origen a una referencia de presión y una referencia de par eléctrico, al existir esto el frenado neumático está entonces funcionando.

La referencia de par eléctrico provoca el frenado eléctrico que en el caso general está con recuperación.

Hay regulación del par eléctrico al nivel requerido.

El frenado neumático es preponderante. Si el frenado eléctrico existe efectivamente (medida del par eléctrico), aliviará en proporción el frenado neumático.

Control del frenado reostático.

El frenado reostático interviene en 2 casos:

- Si durante el frenado por recuperación, la tensión de línea rebasa 850V, el frenado reostático se pide por la lógica, y el frenado se efectuará hasta el final según este modo. El frenado reostático se efectúa entonces con el disyuntor DET cerrado.
- Si la señal de autorización de recuperación está ausente, el frenado reostático se efectúa con el disyuntor DET abierto.



El segundo caso de funcionamiento se controla por la caída de los relevadores RAR1 y RAR2. Dicha caída se produce si la tensión de 24V del par 60-60 A está suprimida.

La caída de los relevadores RAR1 y RAR2 produce la situación siguiente:

- Puesta a 0V de la entrada en la lógica (hilo 401F normalmente a + 60 V lógico).
- Señalamiento "no autorización de recuperar" en cabina de conducción.
- Caída del relevador RPR1 (relevador de permisión de recuperar); hilo 119 a tierra, circuito 119B, 119C y Tierra.

La caída del relevador RPR1 está temporizada a un segundo, lo que deja tiempo en frenado para que el Chopper se acerque al punto de funcionamiento previsto en reostato. A la caída del relevador RPR1 cae también RPR2 (contactos 119, 119D). Esto provoca la caída de del disyuntor D.E.F. (hilo SE, SF), y la conservación de la información de + 60 V lógico por el hilo 401.

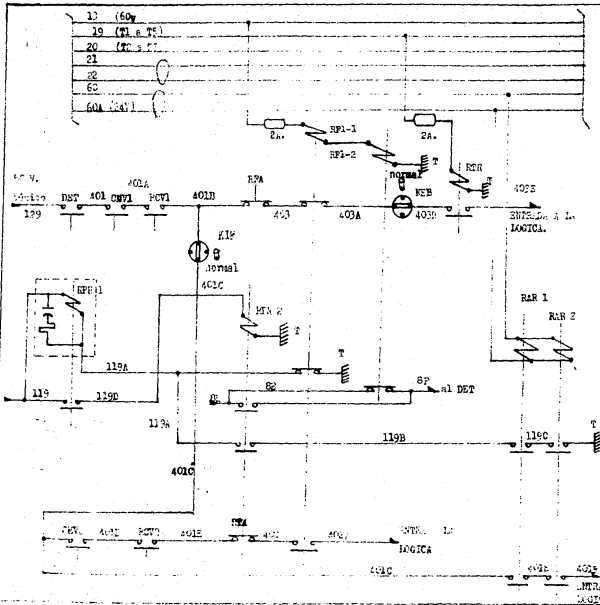
Si los relevadores RAR1 y RAR2 suben durante el frenado, los relevadores RPR1 y RPR2 quedan caídos mientras se está en frenado.

Si se pasa al neutro a tracción, el relevador RF1 - cae; el contacto 119A - T se establece, lo que permite hacer subir de nuevo a RPR1, este relevador se encuentra temporizado a la subida por

razones de señalamiento, es decir que el RPR2 tardará 2.5 segundos para subir otra vez. Este tiempo es tal que el disyuntor D.E.T. tendrá tiempo para subir y el señalamiento "autometría inactiva" no aparecerá indbidamente.

El funcionamiento de RPR1 (o de RPR2 con la diferencia de las temporizaciones) se puede explicar también de la manera siguiente: si este relevador se mantiene cerrado en tracción y con el neutro por RPI, manteniéndose el frenado con los relevadores RAR1 y RAR2. (el contacto de mantenimiento es por el circuito 119A, 119B del relevador RPR2).

Al estar cerrado el disyuntor el circuito está preparado para traccionar.



LEGENDA:

- DET.-DISTINTIVO ULTRA LINEA DE LINEA
- CVT 1-1.- CONTACTO DE LA INTERRUCCION DEL VENTILADOR No 1 y No 2
- RPA.- RELEVADOR DE FRENO
- RV 1-2.- RELEVADOR DE CONTACTO DEL VENTILADOR (No 1 y No 2)
- RPA 1-2.- RELEVADOR DE FRENO No 1 y No 2
- KFB.- COMPUTADOR DE FRECUENCIA EN LA FRECUENCIA
- RFR.- RELEVADOR DE TRACCION
- KIP.- COMPUTADOR DE AISLAMIENTO DEL FRENO ELECTRIC.
- RFA.- RELEVADOR DE TRACCION
- RFR 1-2.- RELEVADOR DE INTERRUCCION DE RECUPERACION No 1 y No 2
- RFR 1-2.- RELEVADOR DE INTERRUCCION DE RECUPERACION (No 1 y No 2)
- T.- TIERRA

FIG. 5.10 Diagrama del control Tracción-Freado eléctrico.

## CALCULO DE LA VELOCIDAD Y TIEMPO DE UNA PARADA DEL TREN.

Fuente que el acoplamiento en vía para nueve carros de tren son movidos por 24 motores de tracción, con lo que se da la siguiente información:

Peso estático en vacío del tren	207 ton
Peso de los motores eléctricos del equipo de tracción	15.35 ton
Peso de 1530 pasajeros (4/4 de carga)	105.41 ton
Total de peso del tren.	

$$207 \text{ ton} + 15.35 \text{ ton} + 105.41 \text{ ton} = 327.76 \text{ ton}$$

Peso del carro por motor ( 327.76 ton/24 )	13.66 ton
--	-----------

El esfuerzo de tracción será desarrollado por cada motor, desde el principio y hasta el final de su marcha; durante el cuál el voltaje aplicado a cada motor se va elevando progresivamente hasta un voltaje máximo, y que corresponde a una velocidad de 30 mill / hr. ( 48 km / hr ).

Tomando la velocidad promedio del tren, para un primer periodo de empuje; éste se detendrá a 25 mill / hr ( 40 km / hr ), si la aceleración máxima del tren es de 3.13 mill/hr/seg ; el tiempo que ocupará será:

$$t_1 = \frac{25 \text{ mill/hr}}{3.13 \text{ mill/hr/seg}} = 8 \text{ seg}$$

Calculando la distancia recorrida tenemos:

$$D_1 = 12.5 \text{ mill/hr} \times \frac{8 \text{ seg}}{3600 \text{ hr/seg}} \times 1760 \text{ yd/mill}$$

$$D_1 = 49 \text{ yd}$$

Considerando las velocidades :

$$V_0 = 25 \text{ mill/hr}$$

$$V_2 = 35 \text{ mill/hr}$$

La velocidad promedio es de 30 mill/hr, de las características del motor de tracción del metro tenemos que; para una velocidad de 30 mill/hr (48 km/hr), se obtiene una corriente aprox. de 650 A y un esfuerzo de tracción por motriz  $K \delta N$  de 18,367 lb (8.2 ton).

El esfuerzo de tracción por motor es por lo tanto:

$$T.E._x = \frac{18,367 \text{ lb}}{4} = 4,592 \text{ lb}$$

$$I_m = 650 \text{ A}$$

De la curva de resistencia del tren obtenemos r que es la resistencia de tracción para una velocidad promedio de 30 mill/hr (48.3km/h):

$$r = 11 \text{ lb/ton}$$

$$T.E._x = W r = 13.66 \times 11 = 150.26 \text{ lb}$$

Ahora el esfuerzo de tracción disponible por aceleración será

$$T.E._a = 4592 \text{ lb} - 150.26 \text{ lb} = 4442 \text{ lb}$$

Por lo que la aceleración se determina de la fórmula normal :

$$T.E._a = 102 K_i W a \text{ (lb)}$$

T.E.\_a      Esfuerzo de tracción a la aceleración .

K<sub>i</sub>      Constante de inercia que se considera en las partes de rotación 10 %.

W      Peso del tren (ton)

a      Aceleración ( mill/hr/seg)

$$\text{Por lo tanto } a = \frac{4442 \text{ lb}}{102 \times 1.1 \times 13.66} = \frac{4442 \text{ lb}}{1532.7} = 2.9 \text{ mill/hr/seg}$$

Por lo que el tiempo tomado para acelerar de 25 mill/hr a 35 mill/hr es de:

$$t_2 = \frac{35 - 25}{2.9} = 3.45 \text{ seg}$$

Calculando la distancia tenemos:

$$D_2 = 30 \text{ mill/hr} \times \frac{3.45 \text{ seg}}{3600 \text{ hr/seg}} \times 1760 = 50.6 \text{ yd}$$

Considerando ahora:

$$V_0 = 35 \text{ mill/hr}$$

$$V_2 = 50 \text{ mill/hr}$$

La velocidad promedio es de 42.5 mill/hr, de las características del motor de tracción tenemos que: a una velocidad promedio de 42.5 mill/hr ( 68.4 km/hr ), tenemos una corriente de 410 A y un esfuerzo de tracción por motriz de 9407.5 lb (4.2 ton).

El esfuerzo de tracción por motor es:

$$T.E._r = \frac{9407.5 \text{ lb}}{4} = 2352 \text{ lb}$$

$$I_m = 410 \text{ A}$$

De la curva de resistencia del tren obtenemos r, para una velocidad promedio de 42.5 mill/hr :

$$r = 16.5 \text{ lb/ton}$$

$$T.E._x = W r = 13.66 \times 16.25 = 222 \text{ lb}$$

(T.E.\_x Es el esfuerzo de tracción de la resistencia)

Por lo que el esfuerzo de tracción será:

$$T.E._n = 2352 \text{ lb} - 222 \text{ lb} = 2130 \text{ lb}$$

Calculando la aceleración de la fórmula normal tenemos:

$$2130 \text{ lb} = 102 \times 1.1 \times 13.66 \times a$$

$$a = \frac{2130 \text{ lb}}{102 \times 1.1 \times 13.66} = 1.4 \text{ mill/hr/seg}$$

Por lo tanto el tiempo tomado para acelerar de 35 mill/hr a 50 mill/hr es de:

$$t_3 = \frac{50 - 35}{1.4} = 10.7 \text{ seg}$$

Calculando la distancia tenemos:

$$D_3 = 42.5 \text{ mill/hr} \times \frac{10.7 \text{ seg}}{3600 \text{ hr/seg}} \times 1760 \text{ yd} = 222.3 \text{ yd}$$

Después de un tiempo de:

$$t = 8 \text{ seg} + 3.45 \text{ seg} + 10.7 \text{ seg} = 22.15 \text{ seg}$$

El tren ha recorrido una distancia de:

$$D = 49 \text{ yd} + 50.6 \text{ yd} + 22.3 \text{ yd} = 321.9 \text{ yd}$$

Si la potencia es entonces cortada, el tren se deslizará y habrá entonces una resistencia del tren por parte del motor; ya que funcionando con alimentación de potencia, las pérdidas se consideran como resistencias al tren, y son de 3 lb/ton, por lo tanto tenemos que:

de la última velocidad media que es de 42.5 mill/hr, con  $r = 16.25 \text{ lb/ton}$ , el esfuerzo de tracción de la resistencia es:

$$T.E._r = 13.66 \times 16.25 = 222 \text{ lb}$$

$$T.E._{\text{total}} = 222 \quad (3 \times 13.66) = 263 \text{ lb}$$

Este esfuerzo de tracción provoca una desaceleración del tren de:

$$a = \frac{263 \text{ lb}}{10^6 \times 1.1 \times 13.66} = 0.17 \text{ mill/hr/seg}$$

y el tiempo para desacelerar es:

$$t = \frac{50 - 35}{0.17} = 88 \text{ seg}$$

La distancia cubierta será:

$$D = 42.5 \text{ mill/hr} \times \frac{88 \text{ seg}}{3600 \text{ hr/seg}} \times 1760 = 1828.4 \text{ yd}$$

Si el freno es aplicado se considera una razón de desaceleración de 4.47 mill/hr/seg ( $2 \text{ m/sec}^2$ ), tomará 44 seg regresar el tren a descansar; durante este tiempo la velocidad media será de 17.5 mill/hr/seg, por lo tanto la distancia recorrida será:

$$17.5 \text{ mill/hr} \times \frac{44 \text{ seg}}{3600 \text{ hr/seg}} \times 1760 = 376.4 \text{ yd}$$

El tren ha recorrido una distancia de:

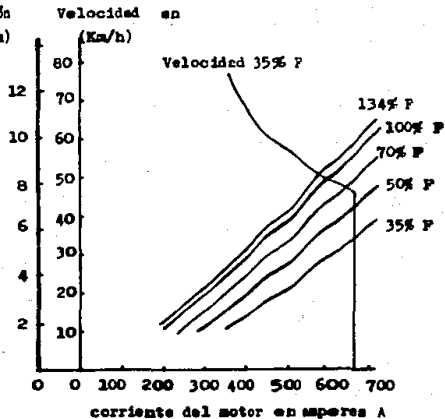
$$321.9 \text{ yd} + 1828.4 \text{ yd} + 376.4 \text{ yd} = 2526.7 \text{ yd}$$

Con un tiempo de:

$$22.15 \text{ seg} + 88 \text{ seg} + 44 \text{ seg} = 154.15 \text{ seg}$$

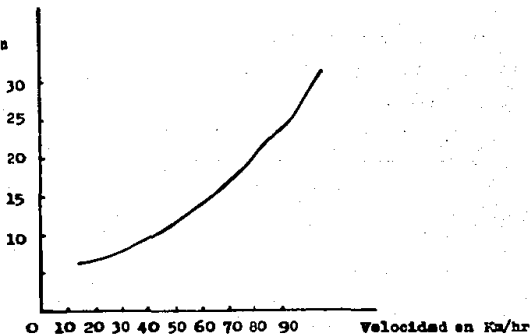


Esfuerzo de tracción  
por M-carro en (ton)



Curva característica del motor de tracción de  
velocidad-corriente y esfuerzo de tracción-corriente

Resistencia del tren  
en ( Lh/ton )



Curva de resistencia del tren resistencia-Velocidad

## CONCLUSIONES

La dependencia tecnológica que sufren los países en desarrollo constituye un factor que debe ser reducido si se quiere llegar a la autosuficiencia, es por eso que en el curso de 19 años de existencia del Metro de la Ciudad de México, destacados profesionistas, técnicos y trabajadores han aportado sus conocimientos al progreso y engrandecimiento de este medio de transporte masivo. La tecnología que emplea el metro es de vanguardia, equiparable -- con las más desarrolladas y esto se debe a que con el curso del tiempo esta organización ha estado pendiente de lo que sucede en este medio; analizando, adaptando, adquiriendo y aplicando todo lo que el S.T.C.M. (Sistema de Transporte Colectivo Metro) necesita para conservar las características básicas de un transporte masivo, como son la seguridad, velocidad y confort.

Ahora, no siempre resulta más económico hacer en el país lo que se requiere, por varias razones, en algunos casos la fabricación de una determinada pieza o equipo implica el uso de maquinaria costosa y altamente especializada, y entonces resulta más barata importarla, o bien la cantidad de piezas que se precisan podrían justificar su importación; en fin hay cosas que no conviene fabricar en el país. por su costeabilidad. Lo importante es que sepa--

mos describir y analizar su operación de algunos equipos o piezas para después hacerlas y elegir el momento oportuno para integrarlas.

En esta época la dependencia tecnológica existe hasta en las naciones más desarrolladas, por razones económicas de recursos propios, por organizaciones o por factores de producción, entre otras causas, como es el caso de la dependencia tecnológica del sistema de transporte colectivo metro.

En los pliegos de condiciones que últimamente están sacando a la luz las administraciones ferroviarias de todo el mundo se hace especial hincapié en el tema de la reducción de gastos de mantenimiento.

El "Chopper" está totalmente en esta línea, ya que el ahorro en su mantenimiento se obtiene con un 40% en relación con otro equipo convencional.

Como todos sus componentes del "Chopper" son estáticos, hay una reducción en gastos de mantenimiento, así como reducción en el consumo de kilowattios hora.

El arranque y frenado se efectúa con suavidad, por lo que se limita la aceleración a un valor tal, que no produzca incomodidad a los pasajeros.

Este sistema es mucho más estable y seguro para realizar el frenado evitando el peligro de averiar los motores durante esta operación que es sin duda la más peligrosa de cuantas realiza un equipo eléctrico de tracción. Es por eso de que con el análisis de la operación del control automático (Chopper) del sistema motriz de la Ciudad de México se han podido obtener las siguientes conclusiones:

- Que es un equipo de operación silenciosa.
- No contamina el medio ambiente (que es uno de los principales problemas por los que atraviesa el Distrito Federal en estos últimos años).
- Consume muy poca energía eléctrica.
- El sistema de transporte colectivo cumple con satisfacción los requerimientos exigidos en este medio como son: confort, seguridad, velocidad y -- frenado para los usuarios; así como la de no consumir energéticos no renovables (energía eléctrica).

Con esto se pretende como ya se dijo anteriormente, conocer más a fondo el funcionamiento de uno de los equipos -- utilizados en el metro, para de esta manera ayudar a proporcionar un mejor servicio y seguridad en uno de nuestros principales medios de transporte.

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

- A) MAQUINAS ELECTROMAGNETICAS Y ELECTROMECANICAS  
LEANDER W. MATSCH. EDIT. REPRESENTACIONES Y SERVICIOS DE  
INGENIERIA, S.A. MEXICO.
- B) THEORIE, FONCTIONNEMENT ET CALCUL DES MACHINES ELECTRIQUES  
A. GUILBERT. EDITIONS DUNOD.
- C) AMPLIFICADOR MAGNETICO Y EL TIRISTOR  
L. NOSBOM. EDITIA MEXICANA.
- D) ELECTRIC TRACTION SYSTEMS AND EQUIPMENT  
HYNDE-HYNDE. EDITION PERGAMON PRESS.
- E) FUNDAMENTALS OF ELECTRON DEVICES AND CIRCUITS  
WEED AND DAVIS. EDITION PRENTICE-HALL.
- F) ELECTRONICA DE POTENCIA  
RAYMOND RAMSHAW. EDIT. MARCAMBO BOIXAREU
- G) MANUAL DEL INGENIERO ELECTRICISTA  
KNOWLTON. EDIT. LABOR.
- H) EL CIRCUITO DE POTENCIA. METRO DE LA CIUDAD DE MEXICO  
JEUMONT-SCHNEIDER. DIVISION AIS.
- I) NOTAS EXPLICATIVAS MP-68 Y MP-82 SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO  
METRO. DEPARTAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL.
- J) MELCO DE MEXICO, S.A. DE C.V.  
EQUIPOS ELECTRICOS MITSUBISHI.

K) DISTRIBUCION DE LA ENERGIA CONDUCTORES.

INSTITUTO DE CAPACITACION Y DESARROLLO S.T.C.M.

CIUDAD DE MEXICO.