

70  
Lej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN

UN ESTUDIO DE LA MÁQUINA DE CORRIENTE  
DIRECTA.

*Tesis que para obtener el título de ingeniero mecánico electricista  
presentan:*

*Rodríguez Ramírez Javier*

*Hernández Lombardini Osvaldo Arturo*

*Asesor: Ing. Ramón Osorio Galicia*

Tesis para obtener el Título de:  
Ingeniero Mecánico Electricista

270170

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

CUAUTITLÁN, EDO. DE MÉXICO.

1999



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL-AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO  
CUAUTITLAN



Departamento de  
Exámenes Profesionales

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E.

ATN.: Q. M. DEL CARMEN GARCIA MIJARES  
JEFE DEL DEPARTAMENTO.

Con base al articulo 28 del Reglamento General de Exámenes,  
nos permitimos comunicar a Usted que revisamos el TRABAJO  
de tesis con el nombre de:

"Un estudio de la máquina de corriente directa".

que presenta el pasante: RODRIGUEZ RAMIREZ JAVIER  
con número de cuenta : 8537810-2 para obtener el Título de :

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos  
necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL  
correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izc., México, a 6 de Noviembre de 1998

Presidente ING. RAMON OSORIO GALICIA

Vocal ING. JESUS GARCIA LIRA

Secretario ING. NICOLAS RODOLFO BALDERAS REYES

1er. Sup. ING. JORGE ADOLFO PELAEZ SALINAS

2do. Sup. ING. ALBINO ARTEAGA ESCAMILLA

***Agradecimientos:***

Voy a aprovechar esta oportunidad para agradecer por escrito a quienes me han ayudado a formarme como persona y a quienes me han ayudado en la educación que hasta ahora he recibido. A mis padres que mucho han sacrificado para hacer de mí una persona de bien. Les agradezco sus consejos, sus sabias palabras, sus desvelos, sus preocupaciones, sus alegrías que tanto me han ayudado. Espero tenerlos mucho tiempo más a mi lado para seguir aprendiendo de ustedes.

Agradezco a mis hermanos su ayuda, a mis profesores los conocimientos adquiridos a mis compañeros de escuela su amistad y a mi esposa a quien agradezco su apoyo, comprensión y optimismo.

Dedico esta tesis a todos ustedes en especial a mi hijo Javier.

Rodríguez Ramírez Javier

## ÍNDICE:

<b>Objetivos de la Tesis</b> .....	1
<i>Introducción</i> .....	2
<b>Capítulo I: La construcción de la máquina .</b>	
I.1 El Estator .....	3
I.2 El Rotor .....	7
<b>Capítulo II: Los principios básicos de los generadores de c.d.</b>	
II.1 La inducción electromagnética .....	15
II.2 La ley de Lenz .....	17
II.3 La reacción de inducido .....	18
<b>Capítulo III: Las curvas de vacío y carga del generador de c.d.</b>	
III.1.1 La curva de vacío del generador de c.d. ....	20
III.1.2 El triángulo de las pérdidas de voltaje.....	21
III.1.3 Obtención de A'' a partir del triángulo.....	22
III.1.4 La característica externa a partir de la tensión en vacío para un generador de c.d. con excitación independiente.....	23

## **Capítulo IV: Los circuitos eléctricos de los generadores de c.d.**

IV.1 Los antecedentes .....	24
IV.2 Las especificaciones particulares del generador utilizado. ....	25
IV.3 Las condiciones de trabajo .....	26
IV.3.1 La conexión del motor sincrónico .....	27
IV.3.2 La excitación independiente .....	28
IV.3.3 La tensión en vacío de la excitación separada .....	30
IV.3.4 La tensión con carga de excitación separada .....	32
IV.3.5 El generador en serie de c.d. ....	33
IV.3.6 La curva con carga del generador en serie .....	34
IV.3.7 La conexión en vacío del generador derivación .....	35
IV.3.8 La curva en vacío del generador en derivación .....	37
IV.3.9 La conexión en derivación con carga .....	38
IV.3.10 La curva del generador en derivación con carga .....	40
IV.3.11 Conexiones del generador compuesto .....	41
IV.3.12 Las curvas del generador compuesto .....	44

## **Capítulo V: Obtención gráfica del triángulo de pérdidas por**

<b>Corriente de carga</b> .....	45
V.1.1 El triángulo de las pérdidas en el inducido (excitación independiente) .....	46
V.1.2 Ampliación de la figura anterior .....	47
V.1.3 El triángulo de las pérdidas en el inducido (excitación derivada) .....	48
V.1.4 Ampliación de la gráfica anterior .....	49

## **Capítulo VI: Las conexiones del motor de corriente directa**

Introducción .....	50
VI.1.1 La ley de la mano derecha .....	51
VI.1.2 La ley de la mano izquierda .....	52
VI.1.3 Motor del tipo paralelo .....	53
VI.1.4 Motor tipo serie .....	54

VI.1.5 Motor del tipo compuesto .....	55
VI.1.6 Control del arranque de un motor de c.d. ....	56
VI.1.7 Nomenclatura de la fig. VI. ....	58
VI.1.8 El control de los generadores auxiliar y exitador en el arranque .....	59
VI.1.9 Nomenclatura de la fig. VII .....	61

## **Capitulo VII: El Freno dinámico**

<i>VII.1 Introducción</i> .....	62
La transmisión eléctrica .....	63
La conexión de los motores de tracción .....	64
El motor en serie .....	66
El freno dinámico de un motor derivación .....	67
Circuito de los motores de tracción (locs. 14 000) .....	68
Circuito de los motores de tracción (detalle) .....	69

<b>Conclusiones</b> .....	70
---------------------------	----

<b>Bibliografía</b> .....	72
---------------------------	----

## Objetivos de la tesis

- 1.- Describir en forma general la construcción y el funcionamiento las máquinas de corriente directa.
- 2.- Describir el funcionamiento de la máquina de corriente directa como generador de potencia.
- 3.- Analizar el comportamiento del mismo generador de corriente continua en base a sus curvas vacío-carga
- 4.- Describir en forma general las conexiones de los motores de corriente directa
- 5.- Enumerar algunas aplicaciones del generador de CD en base, principalmente, a la información obtenida.

## **Introducción**

El presente trabajo se divide en seis capítulos que se enumeran enseguida:

El capítulo I trata de la forma en que esta constituida una máquina de cd, las partes que la forman y su función particular, dividida en dos partes bien definidas como son: el estator y el rotor.

El capítulo II trata sobre los principios básicos de las máquinas eléctricas brevemente se mencionan las principales nociones de electricidad de los generadores de cd y la fórmula general de tensión.

El capítulo III se refiere a la construcción del triángulo de las pérdidas en circuitos cerrados de los generadores. Estas pérdidas tienen que ver sobre todo con el inducido de la máquina.

El capítulo IV describe los circuitos de la máquina para su operación como generador, trata de las conexiones eléctricas y las curvas obtenidas.

El capítulo V trata sobre el cálculo del triángulo de las pérdidas en base a algunos resultados obtenidos del capítulo anterior usando el análisis teórico expuesto en el capítulo III.

El capítulo VI trata sobre las conexiones del motor de corriente directa.

El capítulo VII es una aplicación de la máquina de cd como generador. Acaso en este último caso se da información que no es tan fácil de conseguir. Pero a fin de cuentas, la exposición se da en forma sencilla y contribuye a la bibliografía que sobre estos temas hay en existencia en la FES-C.

# Capítulo I Construcción de la máquina

## 1.1 El Estator

Las diferentes formas, en algunos casos muy extrañas, ideadas por los primeros constructores pertenecen hoy a la historia. Actualmente se tiene un solo tipo, aparte de las variaciones necesarias ligadas a la potencia, dimensiones y usos especiales.

El rotor, colector y escobillas han experimentado, desde las primeras construcciones, importantes perfeccionamientos, pero en el concepto, sus formas actuales siguen siendo mas o menos las primitivas. La mutación más vistosa se tiene en el estator (inductor o campo) del cual actualmente se construye un solo tipo: un cilindro de material magnético que lleva en su interior uno o varios pares de polos.

La figura I representa las modernas formas empleadas para máquinas de dos o más polos.

Los materiales empleados en los estatores son: el hierro laminado o macizo, el acero fundido y la fundición. En todo inductor se distinguen fácilmente las partes características: el polo, la pieza polar y el yugo. En lo referente a las cualidades magnéticas del material a emplear podemos decir que la fundición, por su mayor reluctancia, es el material de peores características; siguen a continuación el acero colado y, finalmente, los mejores en este aspecto son el hierro forjado macizo y el hierro laminado normal, por su menor reluctancia. En la actualidad se obtiene acero colado de excelentes cualidades magnéticas.

Las chapas especiales que contienen silicio, a pesar de ser excelentes en lo referente a las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas, no lo son tanto en lo que se refiere a su permeabilidad. Por consiguiente, estas chapas no deben utilizarse nunca para la construcción de los circuitos magnéticos de las máquinas de corriente directa.

*1.1.1 Materiales para la construcción de carcasas.-* La fundición , todavía utilizada con frecuencia a pesar de su incierta permeabilidad, es sustituida por el acero fundido obteniendo una elevada rigidez mecánica de casi 3 veces superior al de la fundición ( 2 150 000 kg/cm frente a el valor de 850 000 kg/cm ).

En lugar de acero pueden utilizarse planchas de acero laminado curvadas formando un cilindro y soldadas.

*1.1.2 Materiales para los polos.-* Los polos, la parte del circuito magnético que lleva el devanado inductor, siempre son de acero fundido o de hierro forjado o laminado, nunca de fundición. Esto es debido sobre todo a sus condiciones de permeabilidad y economía.

*1.1.3 Materiales para las piezas polares.-* Actualmente, todas las máquinas se construyen con inducido dentado, lo que origina unas variaciones de flujo en la superficie de las piezas polares, variaciones que originan la circulación de corrientes parásitas cuando el material es macizo. Con esto se explica la razón por la cual las piezas polares de muchas máquinas son laminadas.

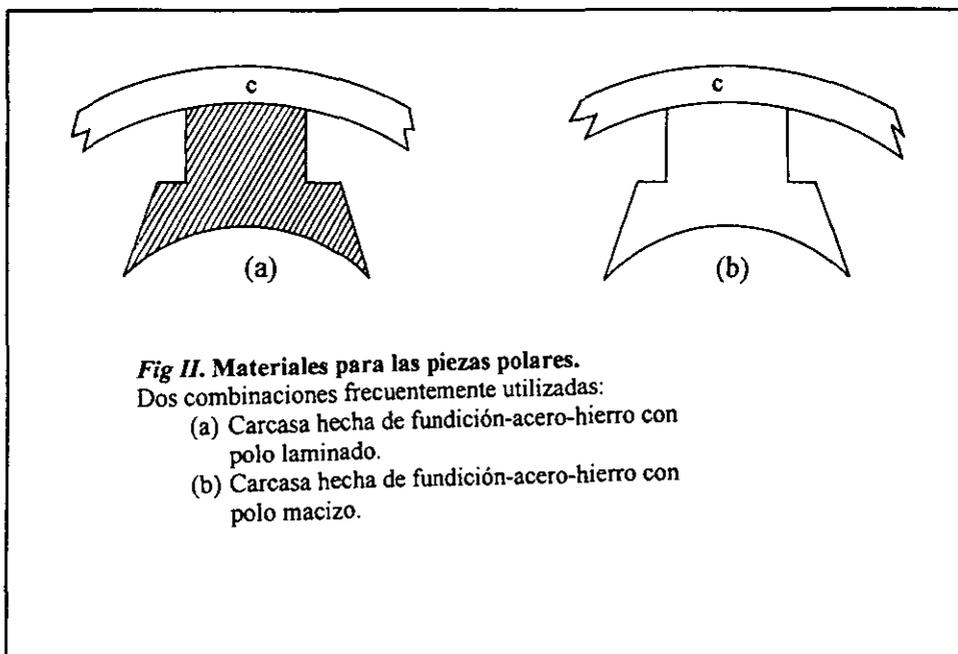
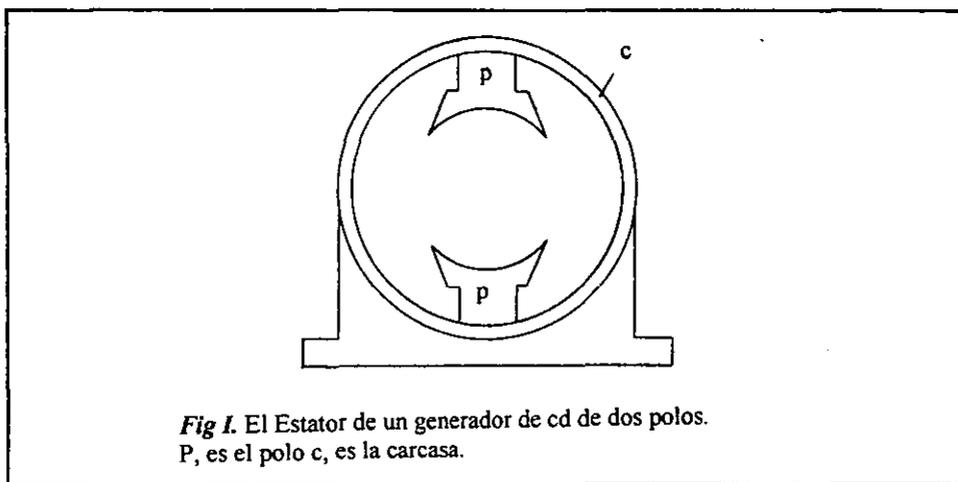
La fig. II ilustra las combinaciones más frecuentemente utilizadas.

*1.1.4 Construcción de la carcasa.-* Por lo general, la carcasa está formada por un cilindro que debe satisfacer las exigencias mecánicas de los estatores. Es necesario reforzar la estructura que sostiene los polos ya que debe tener una sección con un momento de inercia adecuado.

Para dinamos que posean una potencia pequeña, y también mediana, la carcasa es entera, con las modernas construcciones de hierro soldado.

A partir de los 100 kW, e incluso para algunos tipos lentos, es conveniente que la carcasa esté dividida con el fin de facilitar las reparaciones.

*1.1.5 Construcción de los polos y las piezas polares.-* Algunas de las formas de construcción que existen son las que se mencionan enseguida: el modelo de polo fundido con la carcasa, formando una sola pieza. Su forma permite una fácil colocación del devanado inductor.



Otro modelo es, el que está constituido por carcasa y polos obtenidos en una sola pieza de hierro colado, pero la pieza polar es de hierro y está fijada con tornillos.

Por último, mencionaremos el tipo de carcasa de acero fundido colocada en una sola pieza con el polo, y la zapata polar construida de chapa de hierro.

Un inconveniente que se presenta algunas veces, es el llamado zumbido de la dinamo. La máquina excitada emite un sonido mas o menos agudo que es muy molesto. Este fenómeno ha sido objeto de diferentes estudios y al parecer es debido, en la expansión polar, por el paso de los dientes.

Cada diente que abandona la zapata polar provoca una especie de sacudida y la estructura polar empieza a vibrar emitiendo un sonido. Por esto, se puede suponer que este fenómeno depende de los dientes. En consecuencia, por lo anteriormente expuesto, se puede concluir que si no es la sacudida lo suficientemente fuerte ( es decir que se dé el caso de tener dientes finos y numerosos, o entrehierros grandes ) no se manifestará ningún zumbido, como ocurre en algunas máquinas.

Sería útil indicar una solución que ha mostrado tener su eficiencia en gran número de casos. Si los extremos de las expansiones polares están achaflanados, la vibración que se presenta al pasar el diente es menos brusca, más gradual y por consiguiente, la sacudida es más reducida y con esto se disminuye la posibilidad de poner en vibración el polo. De hecho, redondeando los extremos de las zapatas polares o realzándolas de forma que la superficie de las mismas se separe gradualmente del rotor, se consiguen resultados que son satisfactorios (ver figura III).

*1.1.6 Construcción de los devanados inductores.*- Para el buen funcionamiento de la máquina las bobinas de los polos conviene que estén lo mejor ventiladas posible. Por esta razón, en la actualidad los arrollamientos que están sobre carretes aislantes rebordeados, y en general, todos los tipos que obstaculizan la circulación del paso del aire, van siendo abandonados. El sistema de fabricación se basa en las siguientes operaciones:

- 1.- Devanado de las bobinas sobre moldes de madera, efectuado en el torno.
- 2.- Envoltura con cintas de protección.
- 3.- Secado y barnizado mediante los procedimientos indicados a continuación.

La bobina se coloca en el polo y según los casos se fija con piezas de madera o latón ( para máquinas mayores).

Para máquinas pequeñas va generalizándose el proceso estadounidense de deformación de bobinas, denominado con el nombre de momificadas: el devanado una vez efectuado se envuelve rápidamente y se impregna en caliente y en vacío con compuestos aislantes, los cuales convierten a la bobina en un cuerpo compacto, resistente a la humedad, ( ver figura IV ).

La impregnación de los devanados inductores, es con el proceso descrito, también beneficiosa para conseguir una más fácil transmisión del calor desde el interior hasta el exterior.

Una parte que merece especial atención en las bobinas inductoras, es la salida de las terminales de las mismas, las cuales están sometidas ( durante la fabricación y el montaje ) a flexiones y otras presiones mecánicas. Como regla general, todas las bobinas deben estar provistas de terminales flexibles de conductor de lámina delgada. ( O bien de conductor trenzado ).

## *1.2 El Rotor*

*1.2.1 Bandajes y chapas.*- El rotor de todas las máquinas modernas es del tipo de tambor dentado. Los dientes dejan entre sí ranuras abiertas. Los tipos con ranuras cerradas ya no se emplean en las máquinas normales pues, empeoran la conmutación y no permiten la fabricación sencilla de los devanados por separado.

Los dientes pueden estar provistos de una cuña que tiene el fin de retener a los conductores.

Las cuñas son de madera secada cuidadosamente y con impregnación en caliente de parafina, aceite o barniz.

Los devanados rotóricos están retenidos por bandajes de alambre de cobre especial (silicioso, fosforoso, etc.) o bien de acero. También se emplean en algunos casos similares aleaciones con particular elevada resistividad eléctrica y buenas propiedades mecánicas.

Los bandajes metálicos se pueden sustituir con ventaja por bandajes a base de cinta de fibra de vidrio y resina de poliéster.

Una chapita de cobre muy delgada sirve para mantener juntos los hilos aplicados con una cierta tensión sobre el rotor, mientras éste gira en el torno. Una idea de este proceso se muestra en la figura V.

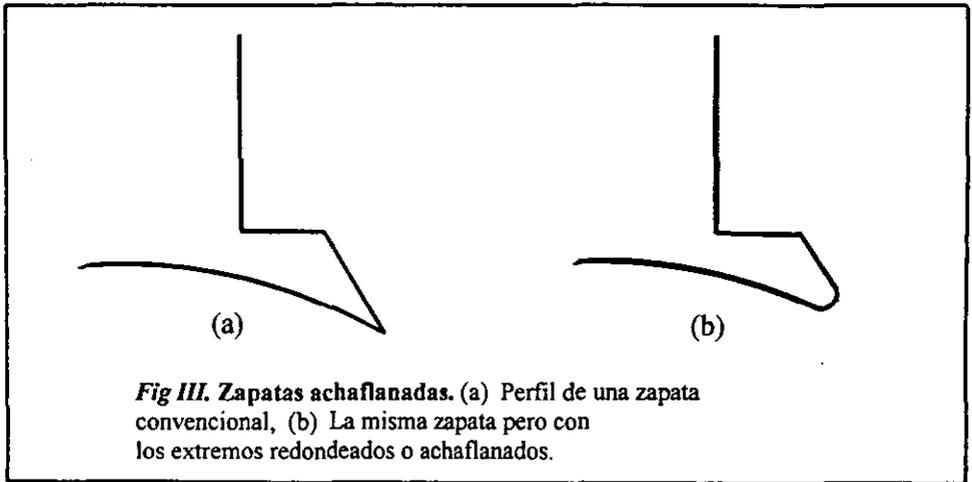
*1.2.2 Colector.-* El colector es un conjunto de láminas o delgas de cobre aisladas entre sí y la maza, cada una de las cuales está conectada a dos terminales de bobina. Las delgas deben de ser de cobre duro y estar aisladas entre si por medio mica o un material similar.

La función del colector junto con sus escobillas será el de obtener un valor instantáneo fijo de una tensión de ca.

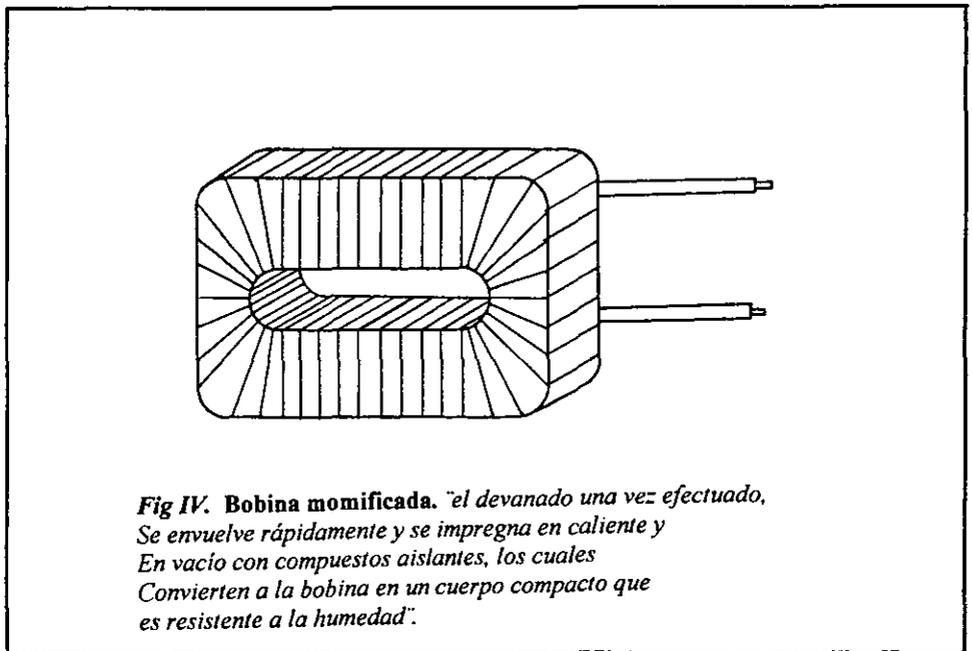
*1.2.3 Escobillas.-* Por lo general, las escobillas que se utilizan en corriente continua están compuestas de carbón, carbón y grafito o de metal y grafito (estas últimas para unidades con intensidades elevadas de corriente como son ciertos tipos de dinamos, motores de automóviles y otros similares a baja tensión ).

Las escobillas pueden fabricarse en diferentes formas y pueden ser cobreadas, agujereadas y conectadas a cables de cobre. Esmeriladas de forma que el apoyo sobre el colector se efectúe radialmente o según un cierto ángulo, y provistas de casquete, para proteger la parte superior de la escobilla de los muelles de presión del portaescobillas, figura VI.

La anchura de la escobilla está limitada por el hecho de no poner simultáneamente en cortocircuito demasiadas bobinas del devanado. Por término medio, la anchura de las escobillas es igual a dos o tres veces el espesor de la delga del colector. En cambio, la longitud y la altura son arbitrarias.



**Fig III. Zapatas achaflanadas.** (a) Perfil de una zapata convencional, (b) La misma zapata pero con los extremos redondeados o achaflanados.



**Fig IV. Bobina momificada.** "el devanado una vez efectuado, Se envuelve rápidamente y se impregna en caliente y En vacío con compuestos aislantes, los cuales Convierten a la bobina en un cuerpo compacto que es resistente a la humedad".

De lo indicado resulta que la anchura varía poco en las diversas máquinas: el espesor de los carbones está dentro del margen comprendido entre 5 y 25 mm para cualquier tipo de máquina, sea pequeña o grande.

El valor de la altura se adapta basándose en el diseño particular de cada máquina.

Debe establecerse una buena conexión eléctrica entre la escobilla y el perno o barra que sostiene el portaescobillas, de forma que la corriente no esté obligada a circular por los resortes que pueden ser de lámina o en espiral que son los que garantizan la necesaria elasticidad de contacto. Es por consiguiente que, todas las escobillas deben llevar cables o láminas flexibles de conexión.

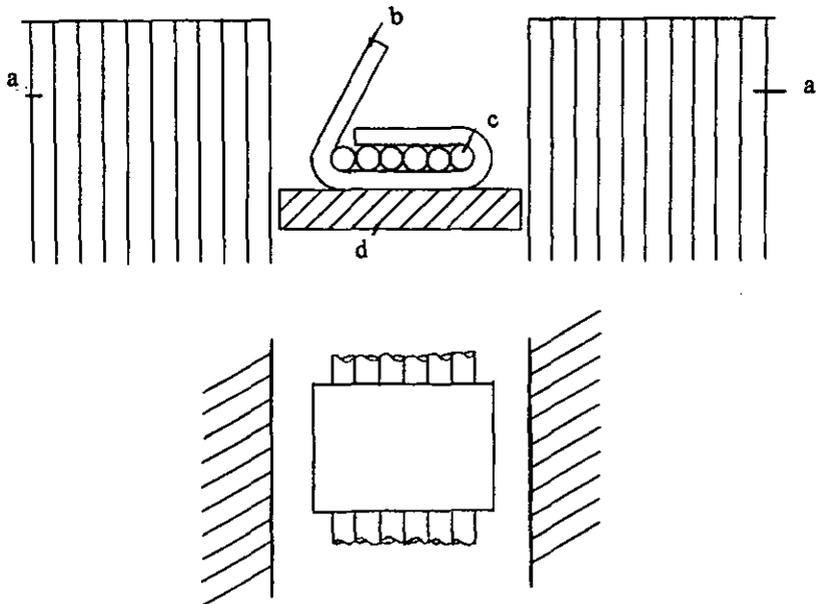
Para asegurar estos conductores se recurre a terminales remachados, o bien, asegurados con tornillos. La escobilla está agujereada en los puntos deseados a una profundidad variable según el diámetro del cordón flexible, o éste se introduce en el orificio en el cual se comprime con polvo metálico según un método especial.

*1.2.4 Portaescobillas.-* Los portaescobillas tienen una gran importancia para el buen funcionamiento del colector.

Actualmente, todos los portaescobillas empleados son del tipo de caja, la cual guía a la escobilla, pudiendo ésta moverse libremente con un cierto juego lateral. Entonces la escobilla se mueve perpendicularmente al colector, y la presión se aplica en el centro de la escobilla ( fig. VII ).

La caja del portaescobillas, debe abrazar al máximo a toda la escobilla y para ello la conexión con el cable debe realizarse directamente en la cara superior de la misma, y el resorte de presión debe ser de una forma que permita aprovechar al máximo la escobilla sin necesidad de una hendidura excesiva en los lados de la caja. Es evidente que el movimiento de la escobilla sobre el colector que es debido al juego de la misma con la caja, será mayor cuanto menor sea, la longitud de ésta última (y menor el desplazamiento cuanto más larga sea la caja). Por esto, las cajas de guía no deben ser demasiado cortas.

El portaescobillas de reacción es un tipo especial que puede aplicarse en el caso de colectores que únicamente deben girar en un solo sentido; en este tipo la escobilla está guiada por un solo lado y su cara superior está en posición inclinada unos cuarenta grados con respecto a las otras formas de escobillas normales ( figura VIII).



**Fig V. Bandajes y chapas del rotor.** Los devanados rotóricos están retenidos por bandajes de alambre de cobre especial, como se muestra:  
 (a) Chapas  
 (b) Chapita de cobre  
 (c) Alambres de bandaje  
 (d) Mica.

La chapa de latón es uno de los materiales más usados en la construcción de los portaescobillas, la más notable de sus características es su resistencia a los efectos del medio ambiente. Sin embargo, se quema fácilmente en caso de cortocircuitos. También se emplean el latón y el bronce, debido a su solidez están especialmente indicados para los motores de tracción, en los que las cajas de chapas de latón podrían abrirse por la parte del roblonado a causa de las vibraciones.

En las máquinas pequeñas se emplean frecuentemente los portaescobillas fundidos de aluminio. Para los resortes de lámina se emplea el fleje de acero y para los de formas helicoidales el alambre de cuerda de piano o de bronce del tipo fosforoso.

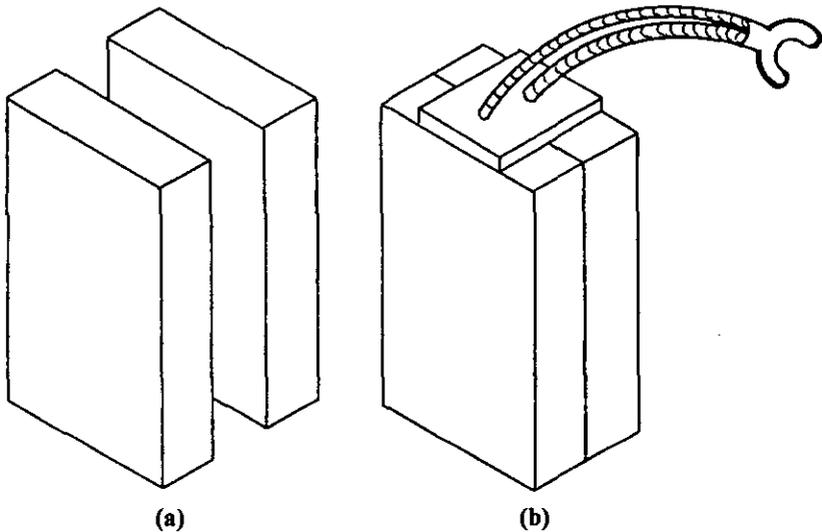
*1.2.5 Collares de portaescobillas.-* Sirven de soporte a los pernos o barras portaescobillas y pueden ser de bronce o a veces de hierro. El collar está provisto de tantos brazos como líneas de escobillas existen; en cada uno de ellos está montado un perno portaescobillas que consta de rosca para su fijación mediante tuerca. Una chaveta o dispositivo similar impide la rotación del perno.

El perno portaescobillas tiene generalmente sección circular o rectangular según el tipo de portaescobillas.

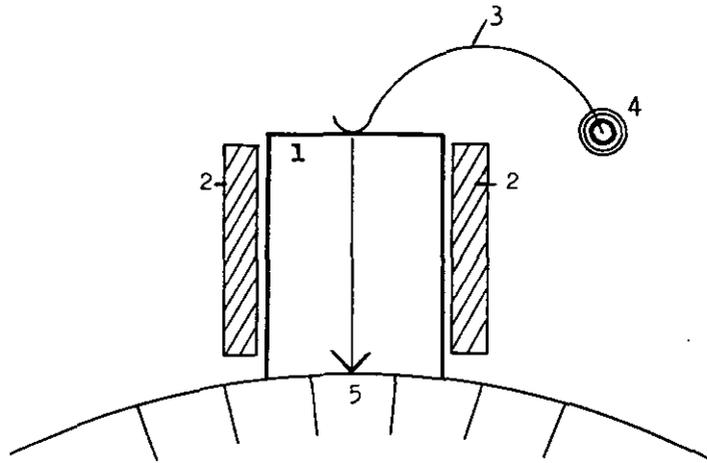
Según las dimensiones de la máquina los collares bien pueden estar sujetos: al soporte, a la base o a la carcasa.

Si la dinamo tiene un colector de gran diámetro, el collar portaescobillas apoyado en el soporte tendría unas dimensiones excesivas y no garantizaría la necesaria resistencia mecánica. En estos casos el collar o anillo que sostiene los pernos se desliza guiado por brazos fijos a la carcasa.

No obstante en las máquinas muy rápidas se prefiere la fijación del collar a la base, pues las vibraciones que se originan por el rotor no se notan tanto en la base como en los soportes, y por consiguiente, se transmiten en menor grado a los portaescobillas. El collar portaescobillas, es absolutamente indispensable que tenga una resistencia mecánica grande.



**Fig VI. La escobilla.** El material de que está formada la escobilla puede ser carbón, grafito o metal. Una pieza en realidad y por lo general está dividida en dos partes iguales (a). los dos bloquitos forman una sola escobilla unidos en la parte superior pero no hay ningún tipo de pegamento entre ellos. Esto es con el propósito de que se tenga una mejor resistencia mecánica (b) de la parte superior precisamente donde están unidos los bloquitos en el dibujo (b) salen dos cables que por lo general son de cobre, ambos cables se juntan en una terminal. Para cualquier máquina eléctrica, no solo de cd la presentación de los "carbones" es como se describió. Solo en máquinas pequeñas, las escobillas son de una sola pieza.



- 1.- Escobilla
- 2.- Portaescobilla (corte)
- 3.- Sujetador presionador
- 4.- Resorte
- 5.- Rotor

**Fig VII. Posición normal de la escobilla.** El dibujo representa esquemáticamente como está instalada una escobilla durante la operación de la máquina: La escobilla (1) Se moverá perpendicularmente al colector del rotor (5). A medida que se gasta la escobilla, el sujetador (3) oprime por la fuerza del resorte acoplado (4) en dirección del colector. De modo que la base de la escobilla se curva adoptando la forma que se ve en el dibujo. La flecha indica el vector de la fuerza aplicada que se transmite desde la parte superior del carbón o escobilla hasta la base (punta del vector). En todo momento debe existir un buen contacto entre la escobilla y el colector.

## Capítulo II: Los principios básicos de los generadores de corriente directa

### II.1 La inducción electromagnética

El fenómeno de la inducción electromagnética se define por medio de la ley de Faraday, principio que lleva el nombre del investigador que en 1831 estableció. Que si un conductor atraviesa un campo magnético, se generará en el mismo conductor una tensión cuyo valor dependerá de la velocidad con que este corte las líneas de fuerza magnética. El valor de la tensión inducida depende también de la intensidad del campo.

La fórmula para describir matemáticamente lo arriba dicho es la siguiente:

$$E_{\text{med}} = \frac{\phi}{t} \times 10^{-8} \quad [\text{V}]$$

donde:

$E_{\text{med}}$ , es la tensión media generada en una sola espira de hilo conductor

$\phi$ , es el número de líneas de fuerza magnética que son atravesadas o concatenadas en la espira.

T ,es el tiempo, en segundos, durante el cual se concatenan las líneas de fuerza en el inductor.

-8  
10 ,es el número de líneas que una espira debe concatenar en cada segundo para inducir una tensión de un voltio en el conductor.

$$1 \text{ Weber} = 10^8 \text{ Maxwell}$$

A partir de la ecuación anterior, podemos obtener la fórmula del generador de cc. Un hilo conductor que gire en un campo magnético con dos polos, variará en 90 grados eléctricos de una posición de nula concatenación de líneas de fuerza a una posición máxima. Para describir lo anterior, en la ecuación el valor de T es de 1/4 de segundo:

$$E_{\text{med}} = 4s\dot{\phi} \times 10^{-8} \quad [ \text{V} ]$$

s , es el número de revoluciones por segundo

Podemos agregar el valor N, como el número de espiras de una bobina de inducido:

$$E_{\text{med}} = 4\dot{\phi}Ns \times 10^{-8} \quad [ \text{V} ]$$

Es necesario incluir más términos para definir la fem media total de un generador de cc. Z, será el número total de conductores de inducido o lados de bobina; a, el número de ramas de bobinas en paralelo entre escobillas

de polaridad opuesta ;  $Z/2a$ , es, por lo anteriormente escrito , el número total de espiras.

Para una máquina con varios pares de polos, multiplicaremos la ecuación por  $P/2$ . Para expresar la velocidad en rpm, tenemos pues :  $s = S/60$ .

De todo lo arriba expuesto tenemos la ecuación de la fem media total inducida entre escobillas:

$$E_g = \frac{\phi ZSP}{60a} \cdot 10^{-8} \quad [ V ]$$

## II.2. La Ley de Lenz

Debemos poner énfasis en que el movimiento de un conductor en un campo magnético es el resultado de una fuerza mecánica (trabajo) aplicada al conductor. La energía eléctrica producida por inducción electromagnética exige, por consiguiente, un consumo de energía mecánica de acuerdo con el principio de la conservación de la energía. El campo magnético no suministra la energía para la inducción electromagnética, ya que el campo no varía ni es destruido en el proceso.

El sentido de la fem inducida y la corriente que circula por un conductor están relacionadas con el cambio en la concatenación de flujo que las induce (ley de Lenz) , esto se expresa:

En todos los casos de inducción electromagnética la tensión inducida tenderá a hacer circular en un circuito cerrado una corriente en un sentido tal que su efecto magnético se oponga a la variación que la ha engendrado.

### ***II.3 La reacción de inducido.***

Todos los inducidos, tanto si son rotatorios como fijos, son recorridos por corriente alterna. En todas las máquinas eléctricas los conductores del inducido están alojados en ranuras en el núcleo de hierro, en donde engendran un flujo o fmm proporcional a la cantidad de corriente que por ellos circula.

Todas las máquinas eléctricas están construidas de modo similar, y se pueden construir para que funcionen como generador o como motor de cc o ca. Las únicas modificaciones precisas para cambiar el funcionamiento de una máquina eléctrica de cc a ca se realizan en las conexiones exteriores de los devanados y en el uso de un colector o de anillos rozantes.

En las máquinas de cc la reacción de inducido se compensa por medio de extremos de polos de alta reluctancia, por medio de la reducción del flujo en el inducido y por devanados de compensación.

La reacción de inducido es, en las máquinas de corriente directa, magnetizante transversalmente y la tensión de reacción de inducido esta retrasada respecto de la tensión generada en 90 grados eléctricos.

La reacción de inducido en las máquinas monofásicas es pulsante, en las máquinas polifásicas y de corriente continua, el flujo de inducido es constante. Los efectos de la reacción de inducido siempre se eliminan en lo posible para las máquinas de cc en general.

### Capítulo III Las curvas de vacío y carga del generador de c.d.

El funcionamiento de un generador de c.d. se describe por medio de dos curvas principales: la curva en vacío y la curva con carga ( también conocida como: la curva de la característica externa ).

La curva en vacío define la operación del generador cuando no hay carga alguna conectada a sus bornes, mientras que la curva con carga es la operación del generador para diferentes valores de resistencia que se conectan a sus terminales.

Siempre es posible obtener la curva de la característica externa a partir de la curva en vacío si se calculan las pérdidas de los embobinados ( incluyendo escobillas ) y las pérdidas por reacción de inducido.

Cuando se conecta una carga a las terminales de un generador de c.d., se establece un circuito cerrado por el que circula una corriente y esto produce pérdidas que están en función de la magnitud de la misma corriente de carga.

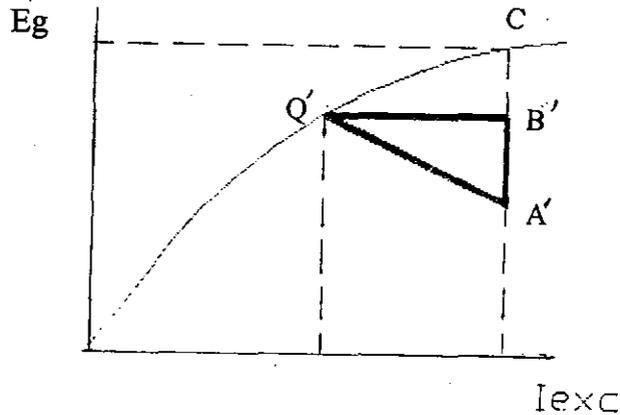
Las pérdidas debidas a la resistencia de las bobinas ( y las escobillas ) están determinadas por el valor de la corriente de carga que varía, mientras que la resistencia por construcción de la máquina , es constante.

Las pérdidas debidas a la reacción de inducido, dependen de los ampervueltas de las bobinas ( que es un valor fijo ) y de la corriente de carga; es claro, que solo se puede variar el valor de la corriente porque los ampervueltas de las bobinas dependen de la construcción de la máquina y por ello este valor es constante.



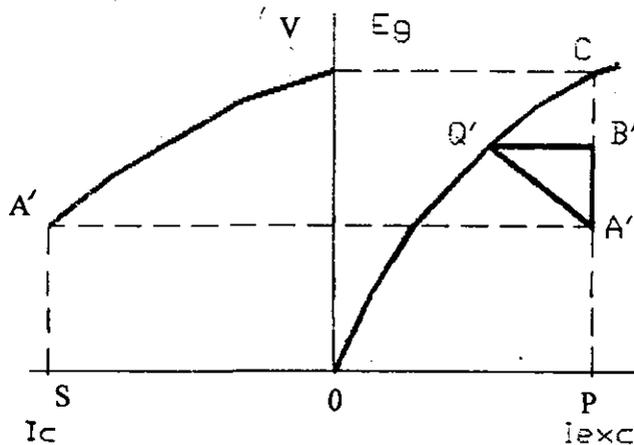
**Fig.1.** La curva de vacío del generador de c.d.

La curva de vacío es la representación del aumento del voltaje generado debido al aumento de la corriente de excitación. El voltaje generado depende de tres factores que son: el número de conductores de las bobinas del inducido, la velocidad del rotor del generador y la intensidad del campo magnético del estator. De estos tres factores, solo la intensidad del campo se puede variar siendo que los otros dos factores están determinados por la construcción de la máquina. El estator de la máquina produce el campo magnético debido al número de pares de polos y la corriente que circula por los devanados de los mismos. Nótese que la circulación no empieza en cero, como cabría esperar, sino a partir de un pequeño valor de voltaje, esto es debido al magnetismo remanente del circuito magnético del estator.



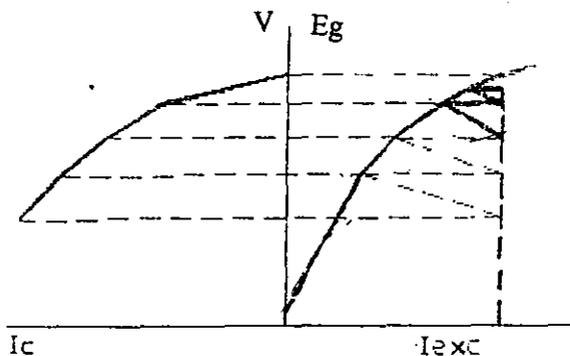
**Fig.II.** El triángulo de las pérdidas de voltaje.

El triángulo se obtiene de la siguiente manera:  $Q' B''$  es el segmento que representa las pérdidas por reacción de inducido para un valor de corriente de carga en particular.  $A'' B''$  es el segmento que representa las pérdidas en los embobinados y las escobillas. Una vez obtenidos los catetos, se completa el triángulo trazando la hipotenusa. El vértice  $Q'$  es el voltaje generado que existiría si no hubiera pérdida alguna.  $A''$  es el vértice que representa el valor del voltaje generado que de hecho existe debido a las pérdidas. Se pueden obtener tantos triángulos como puntos de la curva de vacío para obtener una nueva curva que representará el voltaje con carga. El procedimiento es el mismo, se calculan las pérdidas para cierto valor de corriente de carga y se obtienen los catetos de otros triángulos.



**Fig III . Obtención de A'' a partir del triángulo.**

La fig. III , ilustra la obtención de un punto de la curva de carga de un generador de c.d. a partir de la curva de vacío para el arreglo de excitación independiente A'' es un punto de la tensión del generador cuando se conecta una carga a sus bordes que hace circular cierta corriente a través del circuito cerrado. A'' depende de las pérdidas de reacción de inducido(Q' B' ) y las pérdidas en la resistencia de los embobinados y escobillas (A' B' ). En la fig. III, se observa a la derecha de la línea vertical, la curva en vacío con el triángulo producido por un valor de corriente de carga en particular; a la izquierda de la línea vertical, se ve el resultado de restar a la tensión en vacío el triángulo obteniéndose el punto A''.



**Fig. IV** La característica externa, a partir de la tensión en vacío, de un generador de corriente directa con excitación independiente.

La fig. IV, ilustra la obtención de la característica externa a partir de la curva de vacío para diferentes triángulos obtenidos como resultado de diferentes valores de corriente de carga. Nótese que a mayor corriente de carga, hay un mayor aumento en la disminución de la tensión. La disminución en el voltaje se debe fundamentalmente al aumento de las pérdidas como se puede ver por el aumento del tamaño del triángulo. Hay que tener presente que el propósito de obtener los triángulos es con el fin de saber como se va a comportar la máquina en condiciones de carga.

## Capítulo IV:

## Los circuitos eléctricos de los generadores de corriente directa

### IV.1. Los antecedentes.

En toda máquina eléctrica, tanto para que opere como generador cuanto para que opere como motor, deben darse tres condiciones:

1. - Un devanado que sirva para crear un campo magnético.
2. - Un devanado por el que deba circular una corriente.
3. - Un movimiento relativo entre ambos devanados anteriores.

Estas tres condiciones, en el caso particular del generador de corriente directa, determinan el funcionamiento de la máquina como sigue:

- 1.- El par electromagnético ( que se desarrolla en el conductor por el que circula corriente ) se opone a la rotación del motor primario (la ley de Lenz).
- 2.- La tensión generada ( que se induce en el inducido ), es causa ( ayuda ) de la corriente del inducido.
- 3.- La fórmula de la tensión generada es:  $E_g = V_a + I_a R_a$ . donde  $V_a$  es la tensión en bornes al inducido e  $I_a R_a$ , es la caída de tensión en el inducido.

*IV.2. Las especificaciones particulares del generador utilizado.*

La máquina de cd que se utilizó como generador para la pruebas de laboratorio presenta los siguientes datos y valores nominales.

- A) Potencia nominal. 120 W.
- B) Voltaje nominal. 120 V.
- C) Corriente nominal 1 A.
- D) Velocidad nominal: 1800 rpm.
- E) Inducido con valores nominales de 120 V y 3 A
- F) Bobina serie 3 A.
- G) Bobina paralelo 120 v, 0.4 A.
- H) Reóstato: 0-300 ohmios, 0.4 A.
- I) Número de delgas 75.
- J) Número de ranuras. 25.
- K) R serie (en frío) : 1.79 ohmios.
- L) R paralelo (en frío) : 260 ohmios.
- M) R armadura (en frío) : 5.11 ohmios.

### *IV.3 Las condiciones del trabajo*

Por lo menos, se repitieron para todos los arreglos de las conexiones de éste capítulo, un mínimo de cinco veces todas las mediciones. En días diferentes, se hicieron las pruebas en los laboratorios de IME de la FES-C y al final se pusieron en las tablas valores promedio.

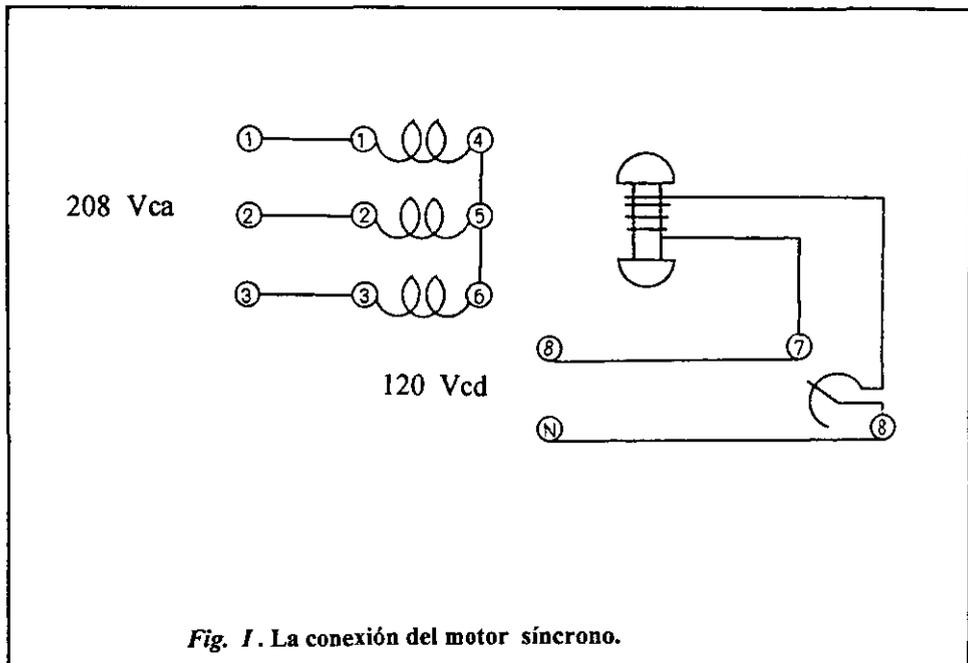
Los ángulos que se utilizan en los cálculos se obtuvieron de la siguiente manera: se tomó un punto de referencia fijo en el estator y se procedió a mover las escobillas para ver donde había menos chisporroteo. El ángulo es una medida de la distorsión del campo magnético producido por el inductor (estator) y el inducido (rotor).

Las medidas en miliamperes, se consiguieron usando multímetros convencionales, que tienen rangos para hacer este tipo de medidas.

Aquellos puntos que a pesar de haberlos repetido varias veces, refiriéndonos tanto a mediciones como a conceptos teóricos que consideramos no estaban lo suficientemente sustentados, decidimos no incluirlos en la Tesis.

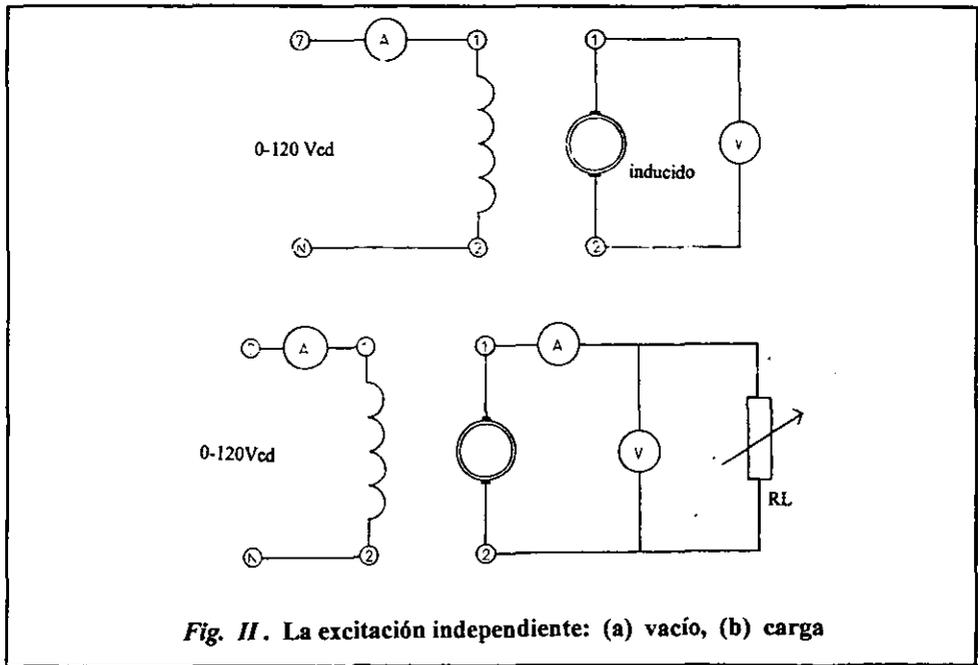
Las curvas que se obtuvieron difieren muy poco de lo que cabría esperar, debido a que tienen forma similar a la que se puede encontrar en otros estudios de máquinas de corriente directa.

Finalmente, también no se incluyeron los análisis del triángulo de pérdidas para aquellos arreglos que no reunían un mínimo de certidumbre aceptable.



**Fig. 1. La conexión del motor síncrono.**

Para impulsar al generador de corriente directa, se empleó un motor síncrono, cuya conexión aparece arriba. En todos los arreglos siguientes, se da por supuesto que se conecta el motor para proporcionar el par que precisa el generador de c.d. El motor síncrono, tiene dos fuentes de alimentación: Una excitación para el estator de ca, y una excitación de cc para los devanados de los polos del rotor. La velocidad del motor síncrono está establecida por la ecuación  $S=120f/P$ , donde P , es el número de los polos; S es la velocidad en rpm y la letra f es la frecuencia en hertz. Es entonces claro que si el número de polos es constante así como la frecuencia, el motor síncrono es un motor de velocidad constante. La principal característica de este tipo de máquinas es que se puede variar el factor de potencia por medio de hacer variar la excitación del rotor.



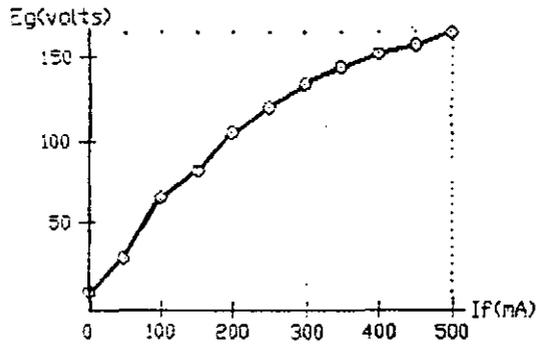
**Fig. II. La excitación independiente: (a) vacío, (b) carga**

La figura II, representa las pruebas realizadas para la obtención de las curvas sin carga y la característica externa de la conexión de excitación independiente para el generador de cd. En esta figura se puede apreciar que el devanado de excitación está conectado separadamente del inducido. La tabla 1 recoge los valores que resultan, en el arreglo (a), de variar el valor de la corriente del campo. El voltímetro conectado a la salida del inducido nos permite medir la variación de la salida de la tensión generada.

La fig II.b, se diferencia del arreglo anterior en que se conecta a una carga variable (RL). Al variar la resistencia se obtienen los valores que se recogen en la tabla 2. También se conecta otro amperímetro para medir la corriente de armadura.

Corriente de campo	Tensión generada en vacío
$I_f$ miliamperios	$E_g$ voltios
0	10
50	30
100	65
150	83
200	105
250	120
300	134
350	144
400	158
500	165

Tabla 1: Valores del generador con excitación independiente en vacío.

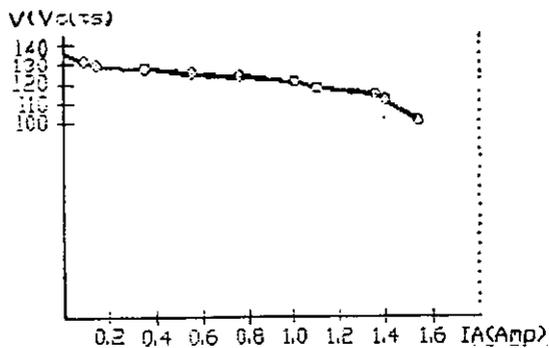


**Fig. III.** La tensión en vacío de la excitación separada.

Los valores de la tabla 1 dan por resultado la gráfica de la figura III. Es de notarse ciertos aspectos de la curva: (1) El origen de la tensión no es cero como podría pensarse, hay una pequeña cantidad de voltaje debido al magnetismo remanente; (2) La curva es de valores proporcionales, casi lineales, de la corriente de campo con respecto del voltaje generado; finalmente (3) Al final de la curva empieza a formarse un codo que viene a representar que a partir de ahí, un aumento en la corriente de excitación no produce un aumento proporcional en la tensión generada. El hierro de los polos excitación y el núcleo circundante del circuito magnético, se aproximan a la saturación. La mayor parte de la gráfica, salvo los extremos representa que el voltage está en función del flujo mutuo del entrehierro.

Carga variable	Corriente de armadura	Tensión generada
RL	Ia	Ea
*	0.10	131
600	0.15	130
300	0.35	128
200	0.55	125
150	0.75	123
120	1.00	120
100	1.10	118
80	1.35	114
75	1.40	112

Tabla 2: el comportamiento del generador con excitación independiente cuando se conecta de diferentes valores de resistencia. El asterisco (\*) significa un valor de resistencia de valor grande.

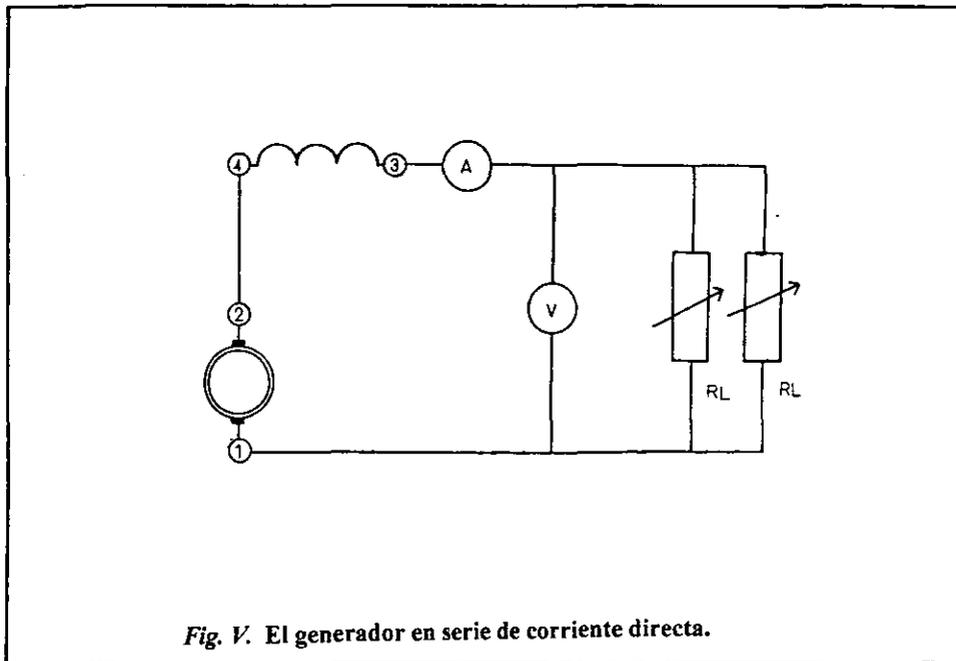


**Fig. IV.** La tensión con carga de la excitación separada.

Los valores de la tabla 2, se grafican como se muestra en la fig. IV. Una vez obtenida la curva, se obtiene la regulación de tensión:

$$\% \text{ REG V} = \frac{131 - 120}{120} = 9.17 \%$$

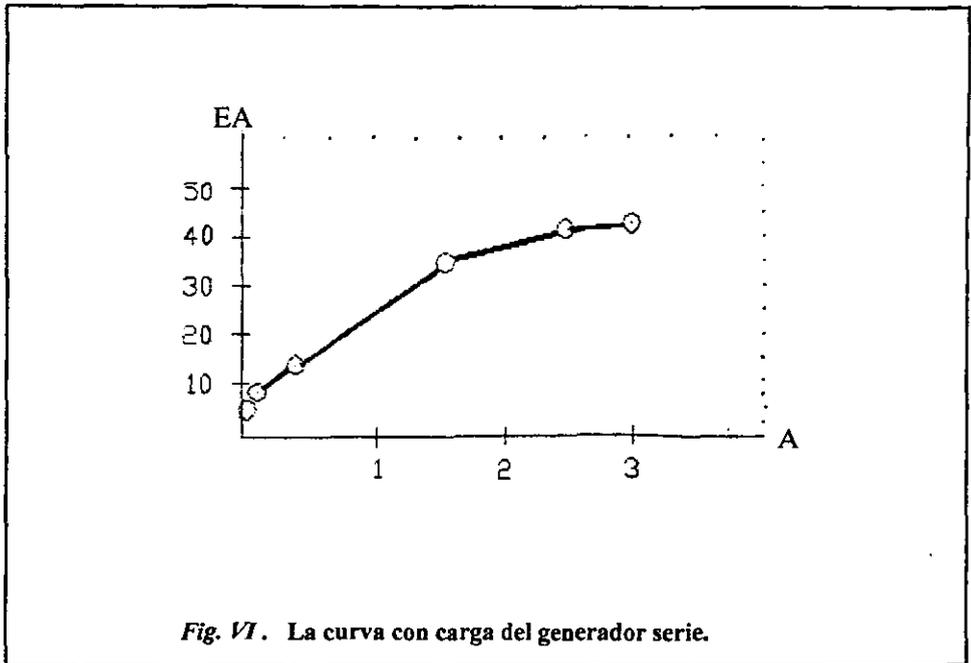
Un valor de 9.17 % para la regulación de tensión es bueno o aceptable. Significa que el generador de cd con excitación independiente está más o menos próximo al generador ideal como fuente de fem constante.



**Fig. V.** El generador en serie de corriente directa.

<i>RT</i> (ohmios)	<i>Ia</i> (amperios)	<i>Ea</i> (voltios)
*	0.00	4.0
57.1	0.07	9.0
28.5	0.30	13.5
19.0	1.60	35.0
14.2	2.50	42.0
11.4	3.00	43.0

**Tabla 3:** valores de la conexión del generador serie de la fig.V. el asterisco(\*)significa un valor de resistencia de valor grande.

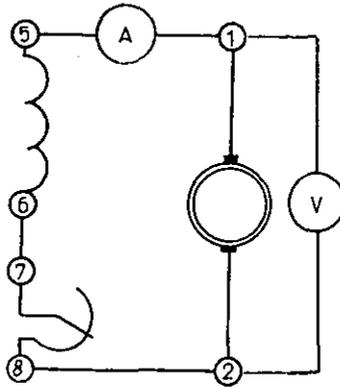


*Fig. VI.* La curva con carga del generador serie.

Los valores de la tabla 3, dan por resultado la gráfica de la fig. VI. Por medio de interpolación se calcula la tensión para un valor de corriente 1 A, dando por resultado 25.5 V. Una vez obtenido este resultado, se obtiene la regulación de voltaje:

$$\% \text{ Reg V} = \frac{4 - 25.5}{25.5} = -84.31 \%$$

El valor de  $-84.31 \%$  es excelente para el generador en serie. Es porque se utiliza para reguladores de tensión solo se obtuvo la curva con carga porque el generador en serie en vacío es incapaz de autoexcitarse.

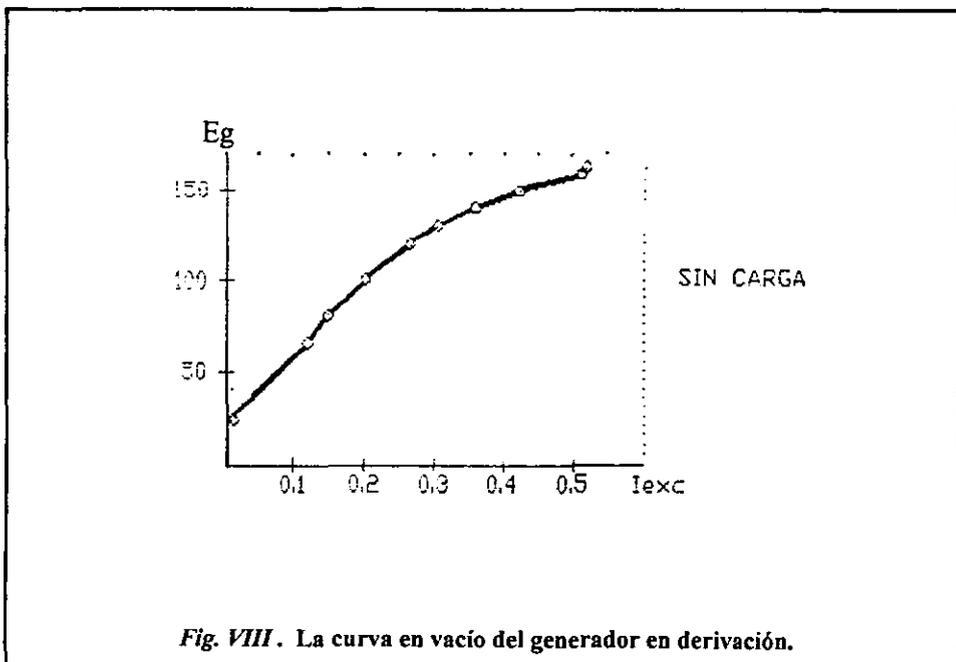


**Fig. VII. La conexión en vacío del generador en derivación.**

Quando el devanado de excitación se conecta a la tensión producida entre escobillas del inducido, se obtiene el arreglo de la fig. VII. Esto es, un generador de cc autoexcitado en derivación. La misma fig. VII representa al generador en vacío. Variando la resistencia (entre las terminales 7 y 8 de la fig.) del campo en derivación, se obtienen los valores de la tabla 5. En vacío, el generador en derivación y el generador de excitación independiente son prácticamente iguales. Empero, se suele utilizar la conexión de la excitación independiente para estudiar al generador derivado porque elimina la pequeña diferencia de resistencia del devanado de campo conectado como se muestra en las figuras VII y IX. La fig. VIII es la gráfica obtenida con los valores de la tabla 5.

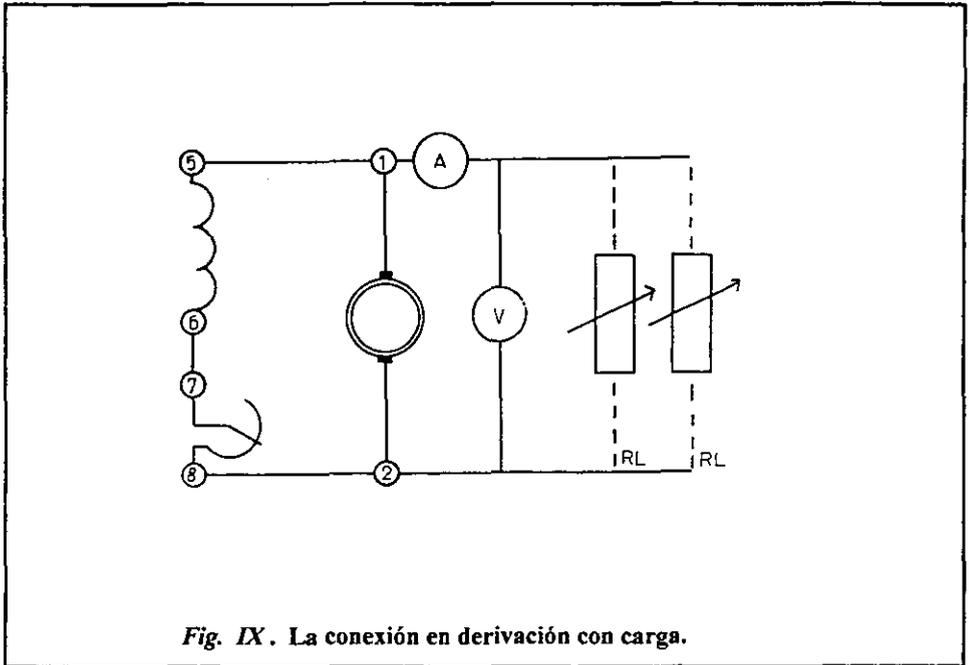
Corriente de campo	Tensión en vacío
la amperios	Ea voltios
0.040	23
0.068	40
0.118	65
0.150	80
0.200	100
0.265	120
0.305	130
0.356	140
0.425	150
0.510	160
0.520	162

Tabla 5: Valores obtenidos para la curva en vacío del  
Generador en derivación.



**Fig. VIII . La curva en vacío del generador en derivación.**

Los valores de la tabla 5 dan por resultado la gráfica de la fig. VIII. Es de notarse que las características de ésta gráfica son muy parecidas a la gráfica de excitación por separado. De hecho, son iguales. Las características de la curva son: (1) Un voltaje remanente; (2) un segmento casi lineal (sin contar los extremos según se aprecia en la gráfica); y (3) un codo que representa la saturación de los materiales, (del circuito electromagnético). Donde se notan las diferencias entre las curvas en derivación y de excitación por separado, es en el arreglo con carga.

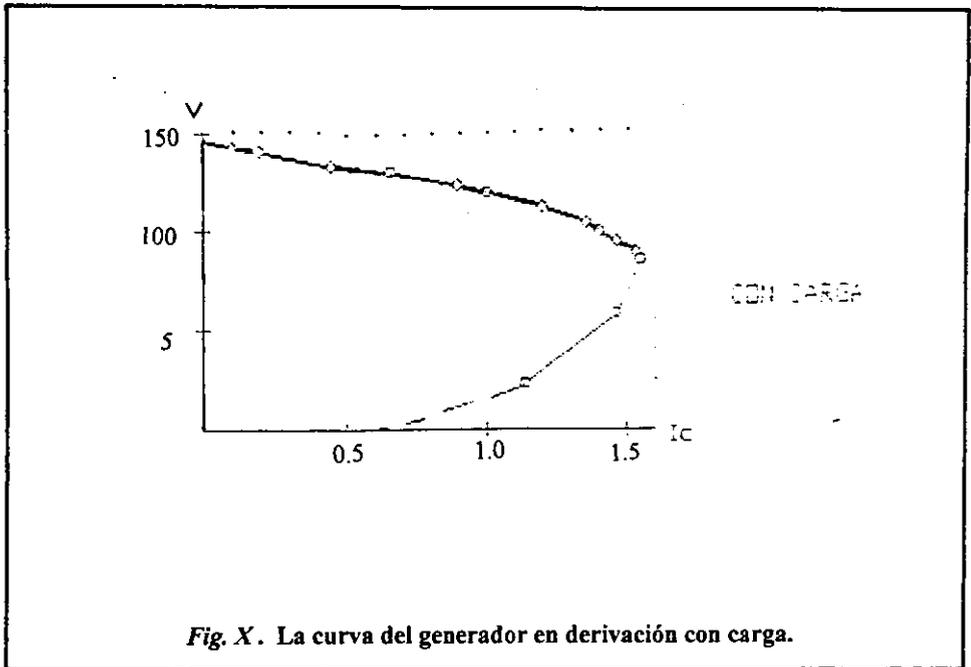


**Fig. IX . La conexión en derivación con carga.**

El arreglo de la fig. IX se utiliza para obtener la característica externa del generador en derivación ( también conocido como generador "shunt" que es el mismo nombre en inglés ). Se obtienen los valores para la corriente de campo y armadura ( $I_a$ ). El amperímetro mide éste valor que se considera sólo como la corriente de la armadura. El voltímetro mide el voltaje generado. Los valores de la tabla 6 se grafican para obtener la curva de la fig. X. De ésta curva se puede notar una pronunciada caída de tensión debida a: 1.- La caída de tensión interna en el inducido debido a la resistencia propia del circuito de inducido; 2.- El efecto de la reacción del inducido sobre el flujo del entrehierro y 3.- La reducción en la corriente de excitación debida a los dos factores anteriores. La disminución de la característica externa es ligera cerca de la carga de valor nominal como se aprecia en la figura X.

Carga Variable	Corriente de armadura	Voltaje generado
RL Ohmios	Ia amperios	Ea voltios
600	0.20	140
300	0.50	135
200	0.60	131
150	0.90	124
120	1.00	120
100	1.20	112
80	1.40	104
75	1.42	100
67	1.47	94
60	1.51	88
57	1.52	85
50	1.55	75
40	1.47	57
28.5	1.12	22

Tabla 6: los valores del generador de cd con campo en derivación para diferentes valores de carga.

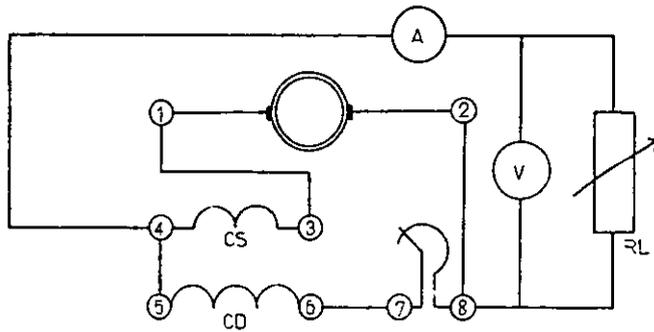


**Fig. X.** La curva del generador en derivación con carga.

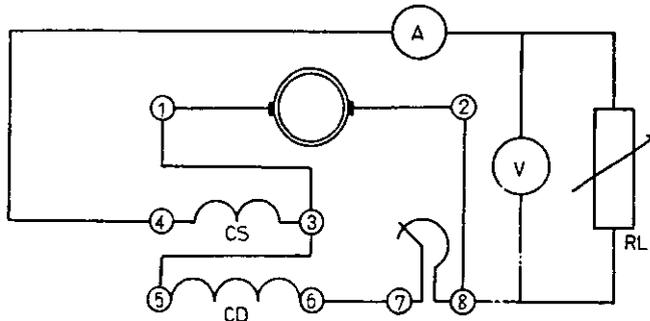
Los valores de la tabla 6, se grafican como se muestra en la fig. X. Una vez obtenida la curva, se procede al cálculo de la regulación de tensión:

$$\% \text{ Reg V} = \frac{140 - 120}{120} = 16.67 \%$$

Un valor de 16.67 % representa una pobre regulación de tensión. Significa que el generador conectado en derivación está lejos del generador ideal como fuente de fem constante. (Pudo haberse tomado el valor de 144 V que es la intersección con la ordenada, esto da un valor de % Reg V = 20 %).



(a)



(b)

**Fig. XI. Conexiones del generador compuesto: (a) largo  
(b) corto**

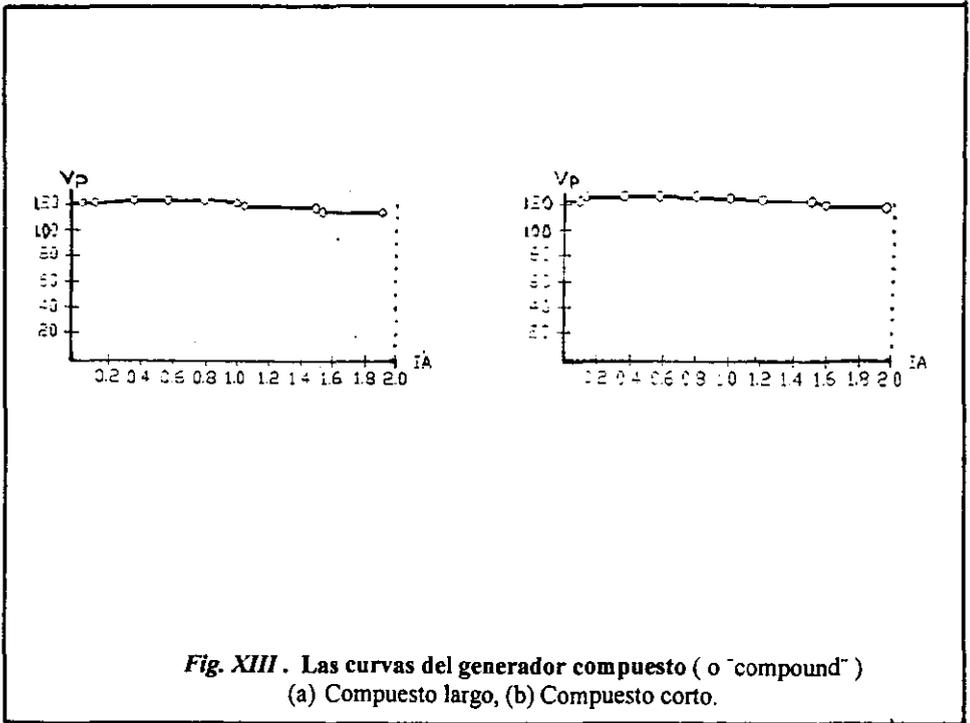
El generador compuesto es una combinación del generador serie y del generador en derivación. Es corto o largo si el devanado serie ( $CS$ ) esta antes o después del inducido. (En serie o paralelo con la carga es corto o largo respectivamente.)

Carga Variable	Corriente de armadura	Voltaje generado
RL Ohmios	Ia amperios	Ea voltios
600	0.13	121
300	0.34	122
200	0.56	122.5
150	0.78	122.5
120	1.02	120
100	1.18	119
80	1.48	118
75	1.55	117
60	1.91	114

Tabla 7: los valores de la conexión compuesta larga con carga variable (generador de corriente directa).

Carga Variable	Corriente de armadura	Voltaje generado
RL Ohmios	$I_a$ amperios	$E_a$ voltios
600	0.11	124
300	0.35	125
200	0.58	125
150	0.80	125
120	1.00	124
100	1.20	123
80	1.50	122
75	1.59	120
60	1.95	117

Tabla 8: Los valores de la conexión compuesta corta con carga variable (generador de corriente directa).



**Fig. XIII . Las curvas del generador compuesto ( o "compound" )  
 (a) Compuesto largo, (b) Compuesto corto.**

Los valores de las tablas 7 y 8, se grafican como se muestra en la fig. XII. La regulación de tensión para sendas curvas se calculan como sigue :

$$\text{Compuesto largo: \% Reg V} = \frac{121 - 121}{121} = 0 \%$$

$$\text{Compuesto corto: \% Reg v} = \frac{122 - 124}{124} = -1.61 \%$$

Ambos arreglos con valores de 0 y  $-1.61 \%$  tienen una buena regulación de tensión. Significa que, el primero es igual al generador ideal y el segundo es muy próximo.

## **Capítulo V      Obtención gráfica del triángulo de las pérdidas por corriente de carga.**

En el presente capítulo, se obtiene gráficamente el valor del triángulo de las pérdidas en el inducido debidas a la corriente de carga parados arreglos en particular. La excitación independiente y la excitación con campo en derivación.

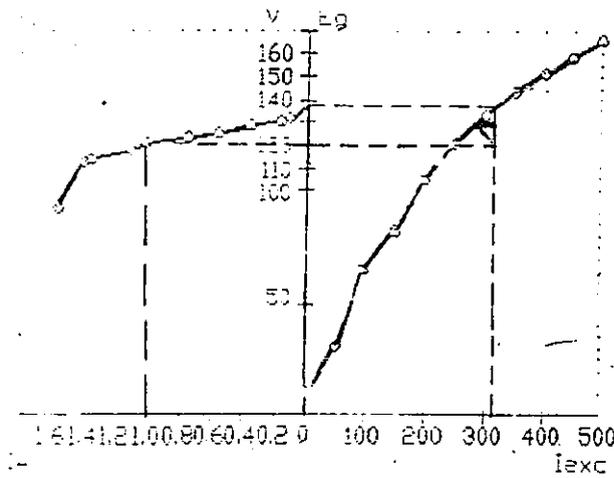
El método empleado consistió en trazar gráficamente las curvas en vacío y con carga para cada uno de los dos arreglos, es decir, para la excitación independiente y para la excitación con campo en derivación.

Para ambos arreglos, se tomó en cuenta el valor de la operación del generador en condiciones nominales, es así que: la corriente de carga fue de 1 A y tensión generada de 120 voltios.

Las curvas se trazaron a escala para poder medir los catetos del triángulo de las pérdidas en el inducido. Los resultados de las mediciones se presentan en éste capítulo mostrándose gráficas de curvas más acordes con el formato de la tesis.

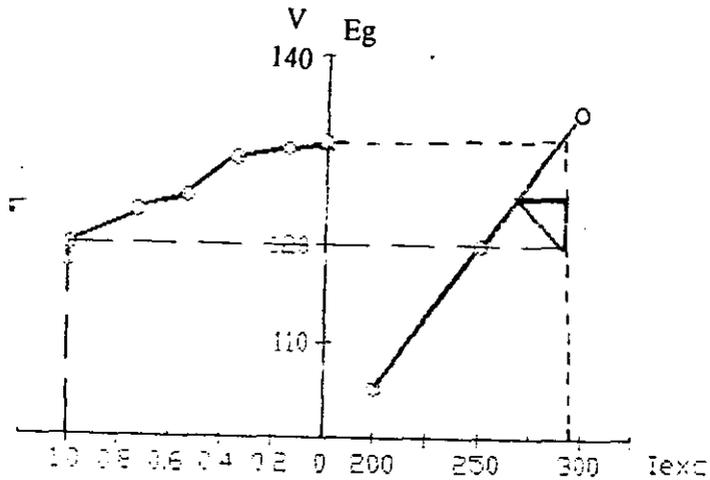
No es por demás insistir en que cada uno de los valores, de cada una de las curvas, para todas las gráficas se midieron al menos tres veces y en diferentes días en los laboratorios de IME; tomándose valores promedio.

Finalmente, se pueden hacer las mediciones tomando los valores sin repetir los trabajos tantas veces obteniéndose de todos modos valores aproximados. En la experiencia de repetir minuciosamente los arreglos presentados varias veces, se pudo comprobar que las variaciones de los valores son mínimas, a pesar de repetir arreglos y mediciones una y otra vez.



**Fig. 1.** El triángulo de las pérdidas en el inducido para el arreglo de la excitación independiente.

En la fig. 1, se puede apreciar (de derecha a izquierda) la curva de vacío y a un lado la curva con carga del generador con excitación independiente. El triángulo representa las pérdidas en el inducido. Para construir el triángulo, se puede apreciar en la figura, se utilizó el valor de funcionamiento del generador en condiciones nominales. El triángulo significa que si no hubiera pérdidas en el inducido, el valor de la tensión generada sería mayor, pero como de hecho hay pérdidas, la tensión con carga disminuye respecto de la tensión en vacío.

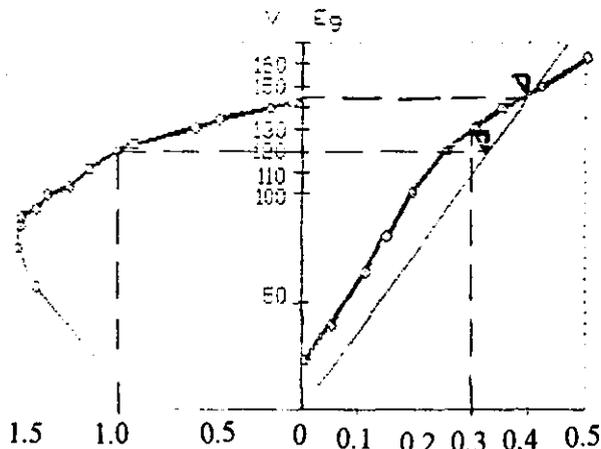


**Fig. II.** Ampliación de la gráfica de la fig. anterior para el triángulo y segmentos de curva.

La fig. II muestra en detalle el triángulo de pérdidas en el inducido. Para éste arreglo en particular, se midió la longitud de los catetos a una escala mayor, obteniéndose los resultados siguientes:

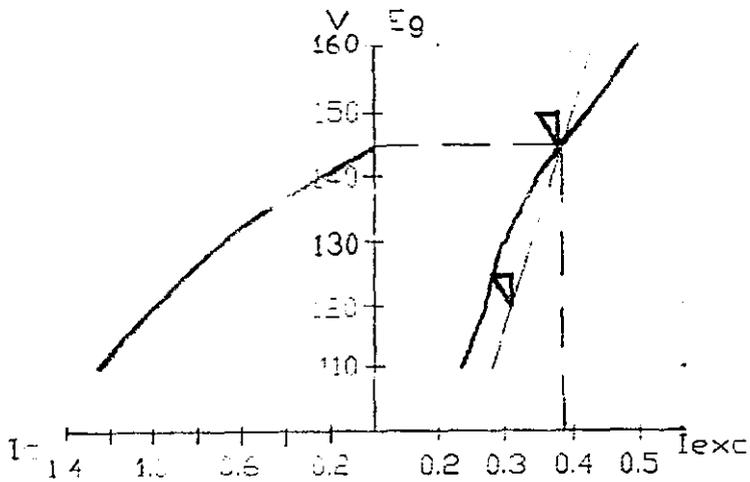
Pérdidas por reacción de inducido = 25 mA

Pérdidas por resistencia en los  
embobinados y escobillas = 5 V



**Fig. III . Ilustración del triángulo de las pérdidas en el inducido para el arreglo de la excitación derivada.**

En la fig. III se puede ver, de derecha a izquierda la curva de vacío del generador de c.d. autoexcitado en derivación y a un lado la curva con carga del mismo arreglo del generador. Se trazó el triángulo de las pérdidas tomando como base los valores nominales del generador, que son 1 A y 120 V. El triángulo apoya su vértice inferior en la recta de la resistencia de carga del generador, ésta recta corta a la curva en vacío en un punto donde empieza a ser más pronunciado el codo. Dicho "codo" representa que más allá de este valor, el aumento de tensión ya no es proporcional al aumento de corriente.



**Fig. IV.** Ampliación de la gráfica anterior donde se ve en detalle el triángulo y segmentos de curva.

La fig. IV. Muestra en detalle el triángulo de pérdidas para la excitación en derivación. Nuevamente se midió a escala los catetos del triángulo obteniéndose:

$$\text{Pérdidas por reacción de inducido} = 0.03 \text{ A}$$

$$\text{Pérdidas por resistencia en los embobinados y escobillas} = 5 \text{ V}$$

## Capítulo VI: Las conexiones del motor de corriente directa

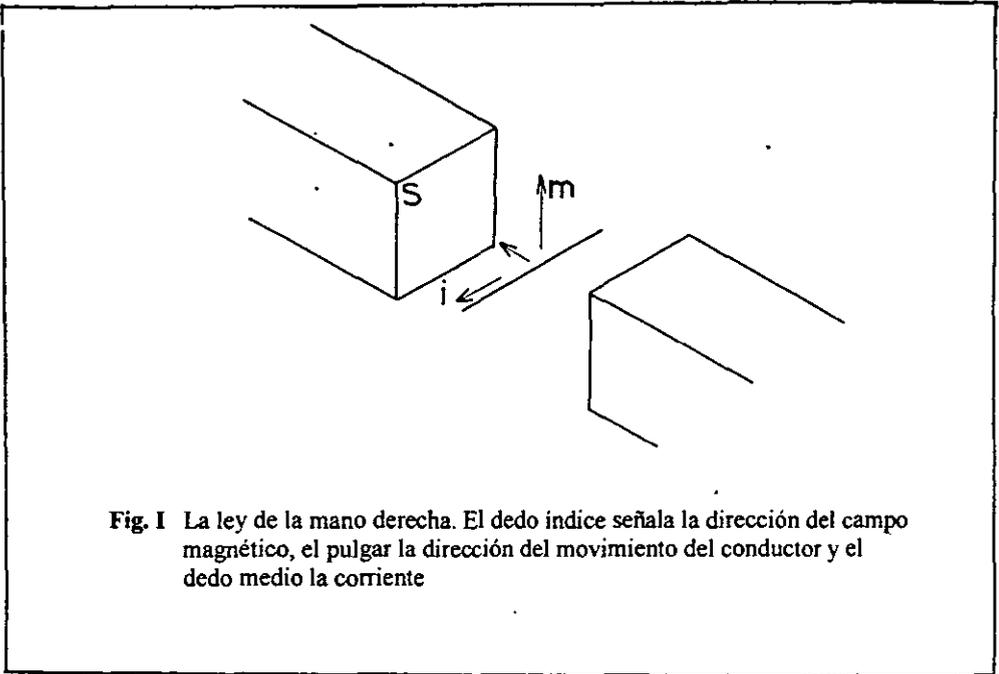
### *VI.1 Introducción*

En el capítulo I se describió la construcción de la máquina de corriente directa y dicha descripción, conviene remarcarlo ahora, es la misma tanto para el funcionamiento como generador cuanto para el funcionamiento del motor.

Asimismo, los descritos para el generador son, esencialmente, idénticos a los arreglos que se emplean para el funcionamiento de la máquina con motor. Las diferencias entre uno y otro funcionamientos se pondrán de relieve en el presente capítulo.

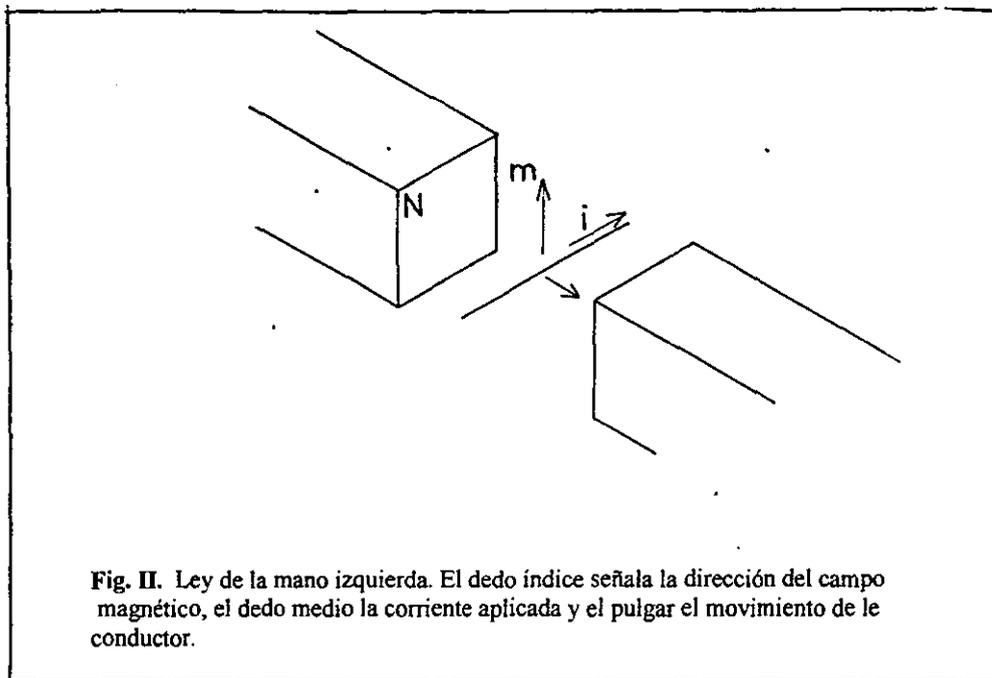
Un motor, es un conjunto de dispositivos que consta principalmente de un estator y un rotor así como los devanados de ambos. El propósito del motor eléctrico es proporcionar un "par" determinado cuando se le aplica cierta potencia eléctrica (voltaje).

En este capítulo se ofrece una explicación de los tres principales arreglos del motor de corriente directa y también los circuitos de control para una bomba de combustible y unos generadores de corriente directa. El "porqué" del circuito de los generadores se explica en la sección correspondiente.



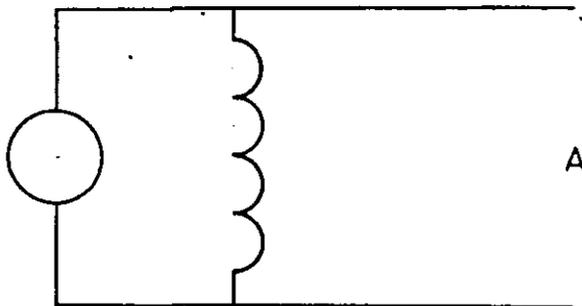
**Fig. I** La ley de la mano derecha. El dedo indice señala la dirección del campo magnético, el pulgar la dirección del movimiento del conductor y el dedo medio la corriente

La fig.I ilustra la ley de la mano derecha que es un recurso nemotécnico que sirve para recordar la relación entre los tres principales fenómenos que se presentan en el conductor. El conductor, cuando se mueve a través de un campo magnético, producirá una corriente en un circuito cerrado cuya dirección depende de las direcciones del campo magnético y del movimiento de el mismo conductor, como se establece en la fig.I. (Solo aparece el conductor que atraviesa el campo, pero se supone que es parte de una espira.)



**Fig. II.** Ley de la mano izquierda. El dedo índice señala la dirección del campo magnético, el dedo medio la corriente aplicada y el pulgar el movimiento de le conductor.

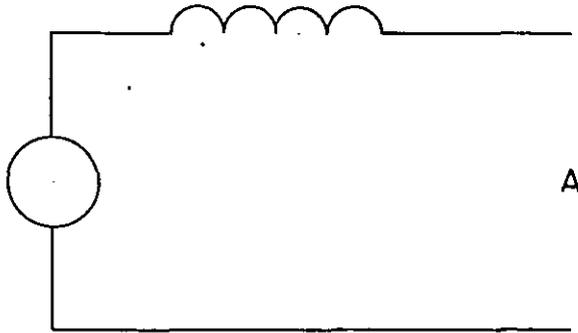
La fig. II ilustra el motor elemental de un solo conductor que se sitúa dentro de un campo magnético. Cuando se le aplica cierto voltaje circulará una corriente y ambas fuerzas ( campo magnético y corriente aplicada ) dan como resultado un movimiento en el sentido que determina el dedo pulgar en la figura II.



**Fig. III.** Motor tipo paralelo. Se utiliza en sistemas de producción que requieran de una velocidad constante a carga variable.

La fig. III representa la conexión en paralelo del motor de CD. El campo y la armadura están conectados paralelamente a la alimentación de la fuente. Cuando este tipo de motores trabaja en vacío la fuerza contraelectromotriz es tan elevada que poca corriente circulará por él y por lo tanto la potencia será reducida.

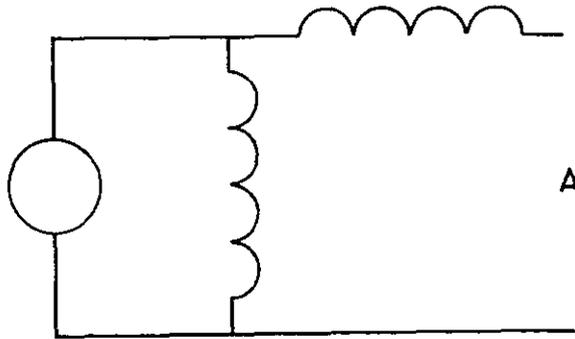
Es de notarse, que todo el voltaje se aplica a través de ambos devanados. La principal ventaja de este tipo de motor es que produce un momento de torsión más uniforme para un amplio intervalo de velocidades.



**Fig. IV Motor tipo serie.** Se utiliza en sistemas de producción que requieran de un elevado par de arranque y velocidad variable a carga variable.

La fig. IV muestra cómo la armadura del motor de C.D. está en serie con su campo. Este tipo de motor es el más ampliamente usado por sus características: elevado par de arranque y velocidad variable a carga variable. La resistencia de los devanados es de un valor pequeño, por eso con un voltaje reducido la corriente que fluya por el motor será alto lo que da como resultado, un elevado par de arranque. Una vez que se pone en movimiento el motor se produce una fuerza contraelectromotriz que se opondrá al voltaje aplicado limitando la corriente, lo que protege al motor de una sobrecarga.

Es de notarse, que en este caso la corriente da energía tanto al devanado del campo como al de la armadura. Si la armadura gira con lentitud, la fuerza contraelectromotriz es pequeña y la corriente es grande, dando como resultado un gran momento de torsión a bajas velocidades.



**Fig. V** Motor tipo compuesto. Consta de dos devanados de campo y este modelo viene a ser la combinación de los dos tipos anteriores.

La fig.V ilustra el motor de C.D. tipo compuesto. Estos modelos, según se conecte el campo en serie apoyando o no al campo en paralelo, se dividen en: compuestos acumulativos o diferenciales respectivamente.

Cabe llamar la atención de que el momento de torsión que produce un motor compuesto esta comprendido entre los que presentan los motores en serie y en derivación.

### *VI.1.6 Control del arranque de un motor de c.d.*

La fig. VI representa el control del arranque de un motor-bomba de combustible. Las líneas gruesas simbolizan la alta tensión y las líneas delgadas el control. Se usan las mismas letras para designar a las bobinas y a los contactores. Esto no representa confusión y es lo que normalmente se utiliza.

En el momento del arranque se presionan momentáneamente cualquiera de los botones FPRB1 o FPRB2. Con esta acción se excita la bobina del FPR y todos los contactos normalmente abiertos (FPR) se cierran. Cuando se suelta el botón, el motor sigue funcionando porque se cierra un contacto para tal efecto.

GSDHR es un dispositivo de protección que sale (o se abre) cuando se excita la bobina (no aparece en el diagrama) y con esto se desconectaría el motor en caso necesario. Para que el motor funcione GSDHR debe aparecer como se muestra en el dibujo.

EC es un interruptor que puede abrirse o cerrarse, esta última posición es la que se presenta en el diagrama y es necesario que este cerrado para que opere el motor.

Los interruptores FCOS, EPS y COP son dispositivos de protección que sacan al motor en caso de un funcionamiento anormal.

Cuando se excita la bobina del FPR, en la parte inferior del esquema, se ven tres bobinas de dispositivos de protección que entran o salen y desempeñan otras funciones en el más amplio circuito del motor diesel.



## **Nomenclatura de la fig. VI.**

*BS.*- Cuchillas del interruptor de las baterías.

*FPB.*- Interruptor del circuito bomba del combustible.

*FPR.*- Bobina del relevador de la bomba de combustible y contactores.

*M.*- Armadura del motor.

*GSDHR.*- Relevador de retención por parada del gobernador.  
(dispositivo de protección)

*EC.*- Interruptor de control del motor diesel.

*ESP.*- Botón de parar el motor diesel

*FCOS.*- Interruptor de corte de combustible.

*COP.*- Interruptor de exceso de presión del colector de aceite.  
(dispositivo de protección)

*FPRBI, 2* .- Botones de restablecer bomba de combustible.

*DV.*- Solenoide de velocidad del gobernador.  
(dispositivo de protección)

*ER.*- Relevador del motor diesel en marcha.  
(dispositivo de protección)

*LIR.*- Relevador de bajo holgar.  
(dispositivo de protección)

## **VI.1.8      *El control de los generadores auxiliar y excitador en el arranque***

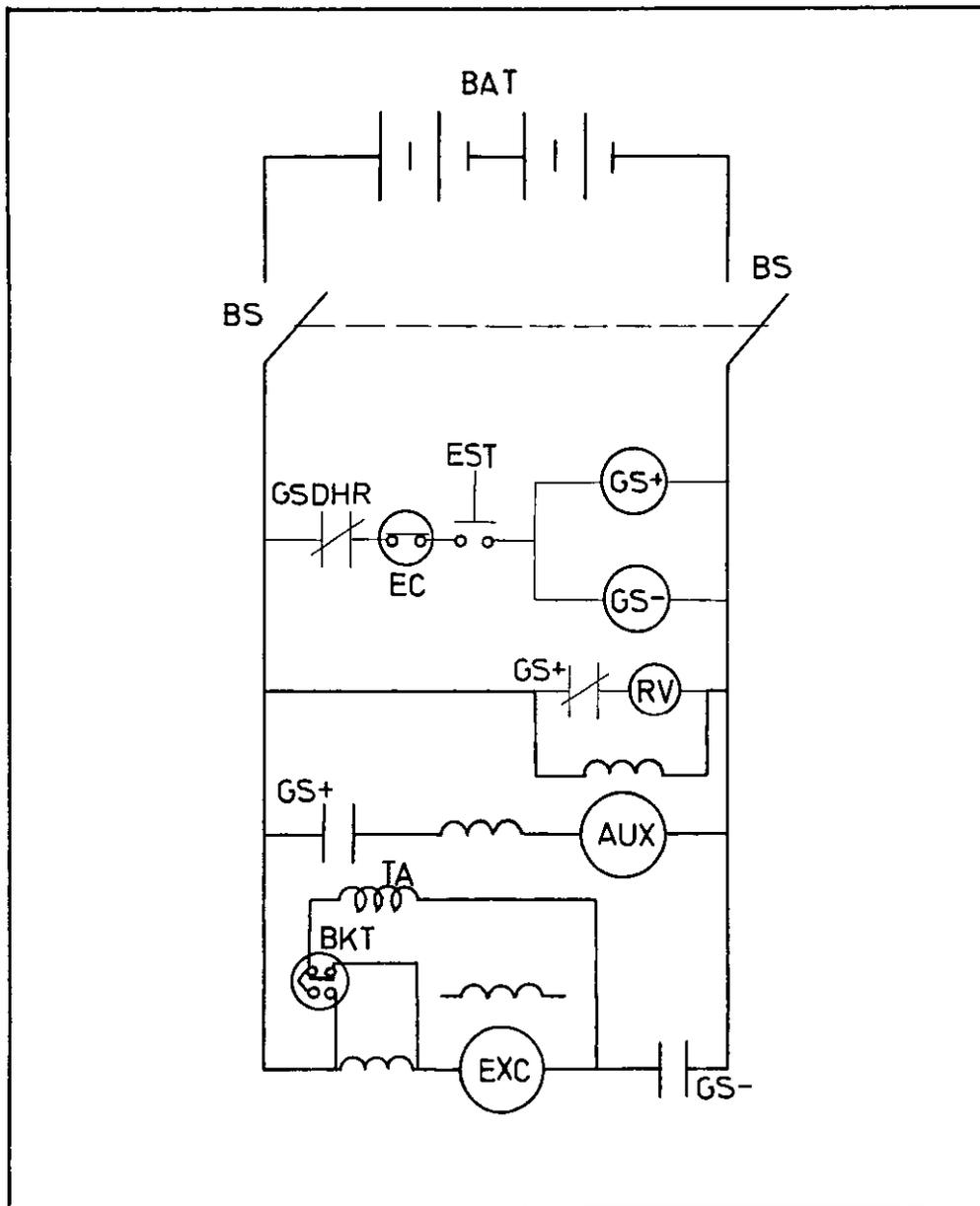
La figura VII representa el circuito de los generadores auxiliar (AUX) Y excitador (ECX) de una locomotora diesel. Nuevamente, como en el dibujo anterior, se cierran las cuchillas (BS) para que entren las baterías (BAT) y las líneas delgadas de baja tensión (o el control).

**En el momento del arranque del motor diesel de una locomotora, los generadores se convierten momentáneamente en motores de corriente directa para impulsar en el inicio al motor diesel. Después de que el motor de combustión rompe la inercia y se pone en marcha los generadores pasan a cumplir su operación de funcionamiento normal.**

Hay que oprimir momentáneamente el botón de arranque EST y mientras se esté oprimiendo se excitarán las bobinas de los contactores de arranque GS+ y GS-. Con esto se cierran los contactos normalmente abiertos para que entren las bobinas en serie del generador auxiliar (AUX) y del generador excitador (ECX) quedan funcionando como motores en serie de corriente directa.

Cuando se suelta el botón de arranque (EST), el contactor normalmente Cerrado (GS+) vuelve a su posición normal y mete el regulador de voltaje (RV) que controla el valor de excitación en paralelo del generador auxiliar. En la parte inferior de la fig. VII, cuando se suelta el botón (EST) sale GS- y el generador excitador alimentará la excitación del alternador principal (TA).

**El generador excitador es un generador de corriente directa excitado por separado que controla al alternador principal. El generador auxiliar es un generador de c.d. en paralelo que alimenta dispositivos auxiliares.**



**Fig. VII** El control de los generadores auxiliar y excitador en el arranque.

## **Nomenclatura de la fig. VII**

*BAT.*- Banco de las baterías.

*BS.*- Cuchillas del interior de baterías.

*GS+* Bobinas y contactores de arranque.

*GS-*

*RV.*- Regulador de voltaje del campo del generador auxiliar.

*AUX.*- Armadura del generador auxiliar.

*EXC.*- Armadura del generador excitador.

*EC.*- Interruptor de control del motor diesel.

*GSDHR.*- Relevador de retención por parada del gobernador

*EST.*- Botón de arranque del motor diesel.

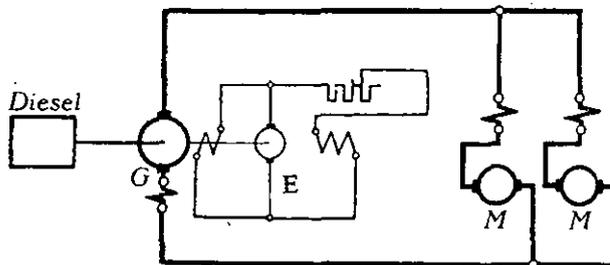
### *VII. 1 Introducción*

Una aplicación muy interesante de la máquina de c.d. se emplea en ciertos modelos de locomotoras. Aquí se explicarán solamente diagramas "general electric" pero los principios en los que se basa la explicación son válidos para dispositivos de otras marcas.

Un tren consiste en determinado número de vagones (o carros como se les llama dentro del ámbito ferrocarrilero) , que son empujados por una o varias locomotoras. La locomotora consta de un motor diesel que proporciona una potencia mecánica de hasta 3 000 hp.

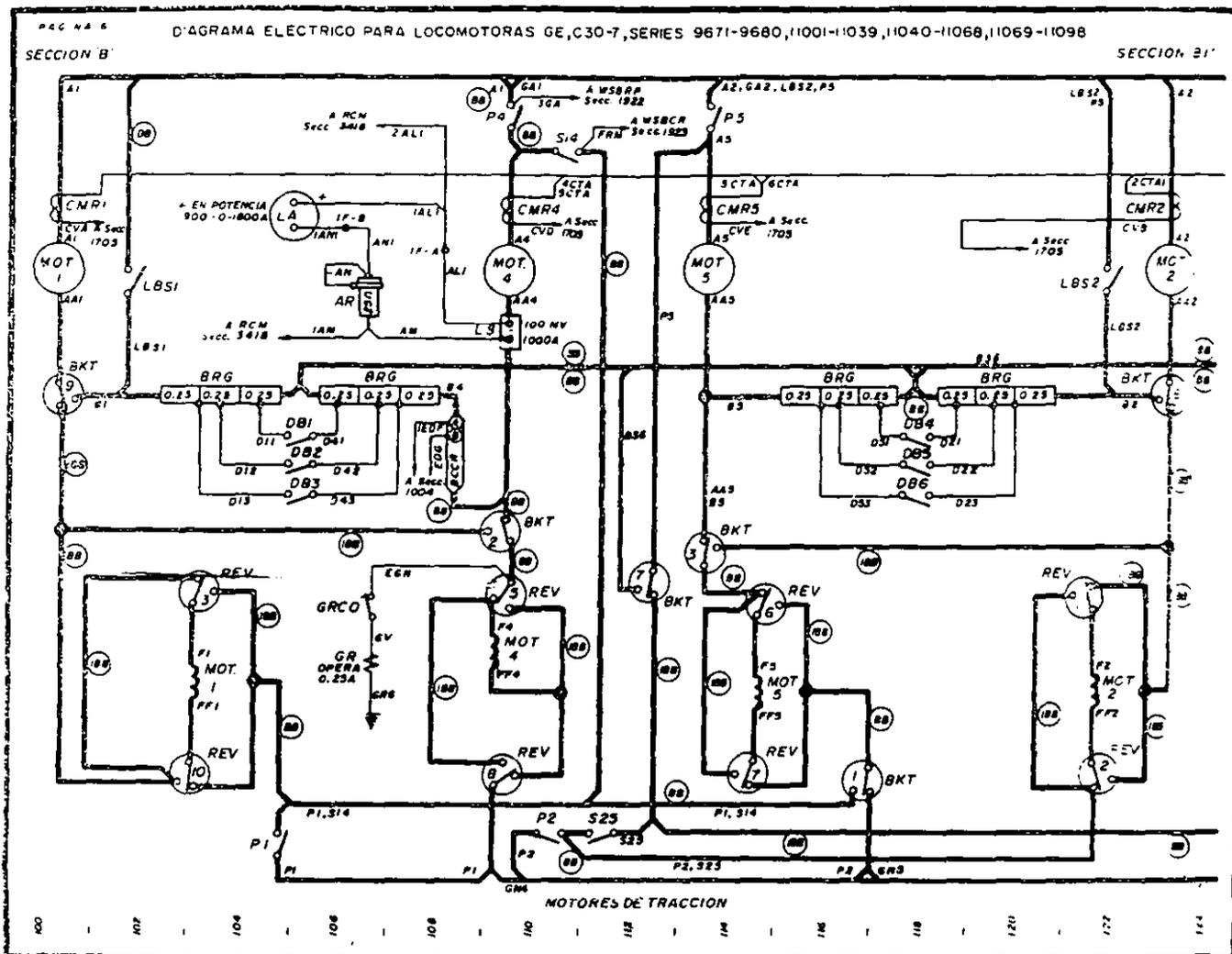
La potencia proporcionada por el motor diesel de combustión interna se transmite a un alternador. El alternador alimenta a una serie de motores de tracción de corriente directa (previa rectificación) , que están acoplados cada uno por medio de un engrane a cada par de ruedas de la locomotora (mancuerna) .

Los motores de tracción empujan a la locomotora y al tren a diferentes velocidades. Cuando es necesario disminuir la velocidad de todo el sistema, se emplean los frenos de aire que aplican unas zapatas a las ruedas para ir disminuyendo la velocidad. Para ayudar a detener el sistema, a cierta velocidad, se hace una transición de los motores de c.d. y estos se convierten en generadores c.d.



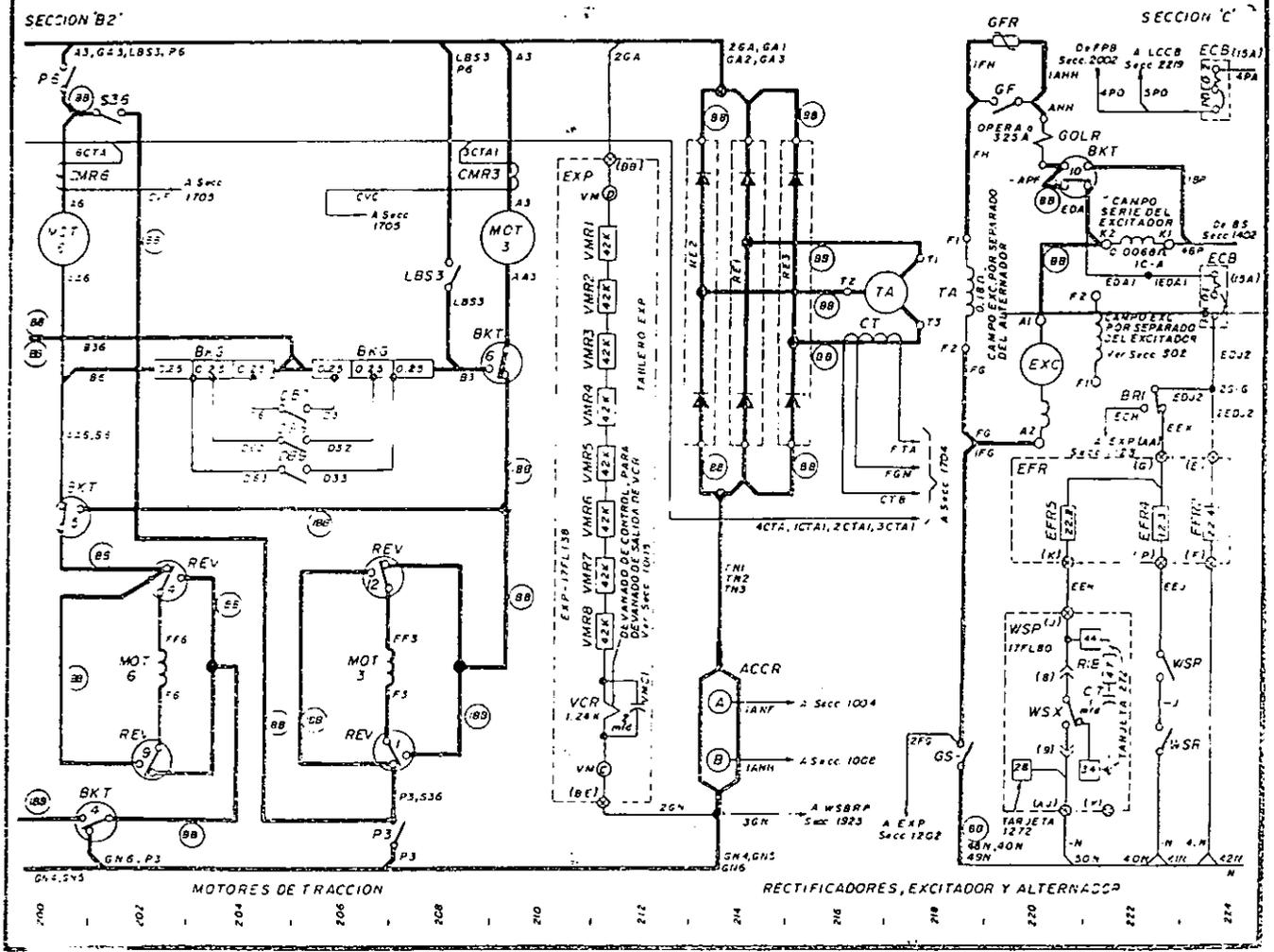
**Fig. I** La transmisión eléctrica.

Las locomotoras son automotores que pueden ser definidos por medio de un esquema simplificado de conexiones de una transmisión eléctrica. Dicho esquema consta de un motor de combustión interna diesel que por medio de un eje (cigüeñal) transmite su potencia mecánica a un generador eléctrico (G) y éste alimenta a los motores de tracción (M). Los motores son de c.d. y su par acciona, a su vez, los ejes del automotor. Acoplado mecánicamente al mismo cigüeñal esta el excitador (E) del generador eléctrico. Todos los mecanismos son un sistema automático para los cuales una vez establecida una velocidad determinada, puede hacerse variar la excitación para obtener las tensiones necesarias. Esto también es conocido como un sistema de velocidad y potencia constantes.



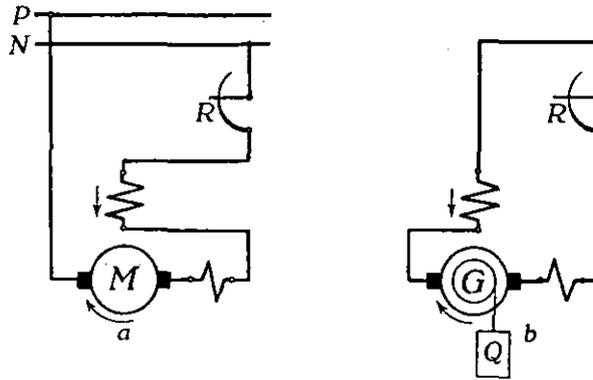
**Fig. II** La conexión de los motores de tracción.

La fig. II es una página del diagrama eléctrico para locomotoras. nueve mil y once mil, cortesía del instituto de Capacitación Ferrocarrilera. Para el motor 4 (MOT.4) A4 y AA4 son las conexiones de la armadura, F4 y FF4 son las conexiones del campo. El inversor (REV) tiene varios interruptores para invertir el sentido de giro de los motores. El interruptor "BTK" opera para el funcionamiento de freno dinámico.



**Fig. III** La conexión de los motores de tracción (continuación).

En la fig. III se puede ver el generador de tracción (TA), el generador excitador (EXC) que alimenta al campo de excitación por separado del alternador (TA) y otros dispositivos complementarios. Nótese al centro los bancos rectificadores y a la izquierda las parrillas del freno dinámico "BKG", ( los valores de las resistencias de las parrillas son de 0.25 ohmios).

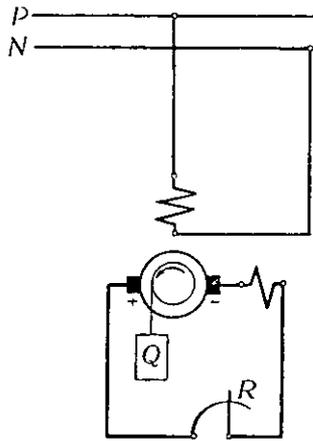


**Fig. IV El motor en serie:**  
**(b) Frenado reostático**

**(a) Motor**

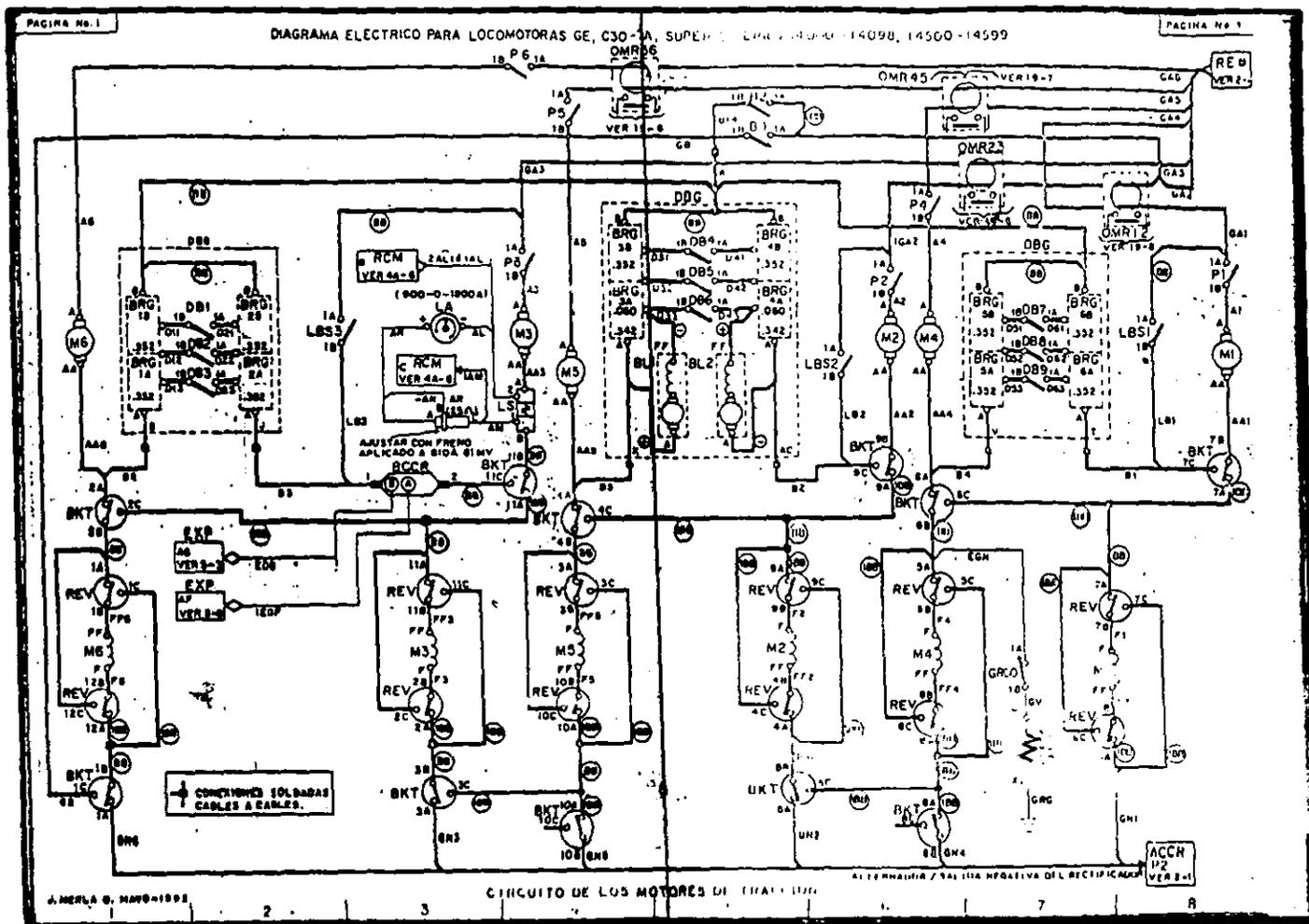
Los motores de tracción de las locomotoras son del tipo serie y sus características son: elevado par motor de arranque y velocidad variable a carga variable. La fig. IV ilustra la conexión del motor y la conexión de freno dinámico o reostático. Al respecto, el profesor Emilio S. Spiney dice:

"Si se desconecta de la línea alimentadora de energía un motor de corriente continua y éste sigue girando arrastrado por la máquina accionada por él ( como puede ser el caso de una locomotora que desciende por una pendiente ), debido a la reversibilidad de las máquinas dinamoeléctricas, el motor se convierte en un generador y la energía producida por este puede ser absorbida en resistencias conectadas a los bornes del mismo..., de donde resulta un efecto de frenado."



**Fig. V. El frenado dinámico de un motor-derivación.**

El motor de tracción funciona con la conexión en serie para impulsar la locomotora pero se conecta en derivación (fig. V) en funcionamiento de freno dinámico. Esto es porque para operar con el arreglo de la fig. IV (b) se deben de cambiar las terminales cuando funciona como generador porque la corriente en el inducido de la dinamo en serie y de un motor en serie girando en el mismo sentido de circulación contraria. Si no se intercambian las terminales el resultado anularía el efecto de frenado porque la corriente se opone al magnetismo remanente. Para frenar dinámicamente un motor derivación solo se tiene que separar el inducido de la línea, manteniendo el inductor conectado a la misma y se cierra el circuito del inducido como se muestra en la fig. V.



**Fig. VI. Circuito de los motores de tracción (locs. 1400).**

En las locomotoras serie 14 000 la energía del freno dinámico además de disiparse en resistencias (BRG) alimenta también dos ventiladores (BL1 y BL2). Ambos ventiladores aparecen al centro de la fig. VI. En la figura VII se aprecian en detalle.



## Conclusiones

Dos curvas principales describen el comportamiento de un generador de corriente continua: la en vacío y la curva de la característica externa. Se define a la característica externa como la operación del generador en carga. Se obtuvo la característica externa de cuatro arreglos principales que son: la excitación independiente, conexión en serie, conexión derivación conexión compuesta. Con ayuda de estas curvas podemos considerar las siguientes conclusiones:

- 1.- El generador con excitación independiente por la forma de su curva tiene su aplicación más común como: amplificador-multiplicador y tacómetro. En el primer caso, la tensión de excitación y la tensión en el inducido son los valores de entrada y de salida, respectivamente, de una función de transferencia cualquiera ( $V_{\text{salida}}/V_{\text{entrada}}$ ). En el segundo caso, la tensión en el inducido se supone proporcional a la velocidad de giro. Entonces, conociendo el voltaje conozco la velocidad y viceversa.
- 2.- El generador en serie tiene un % Reg V muy excelente, por lo que se usa como un elevador de tensión de una línea de c.d. La curva completa de la característica externa de este arreglo tiene un tramo donde el generador es una fuente de intensidad constante de c.c. ( Esto último es para conocimiento adicional, ya que el generador del laboratorio no permitió que se obtuviera la curva completa ).
- 3.- El generador derivación, en valores que no rebasen el punto de funcionamiento nominal o que sean próximos a este, tiene su tensión prácticamente constante. Es por esta peculiaridad que es de los más usados arreglos. Para que la tensión durante su funcionamiento quede lo más constante posible, se usan dispositivos de regulación.

## Conclusiones

4.- El generador compuesto, también es de amplio uso por su tensión prácticamente constante ( igual que el generador derivación) La regulación de tensión (% Reg V) de la conexión compuesta larga.

5.- La máquina de corriente directa tiene la versatilidad de poder funcionar tanto motor como generador. En locomotoras se utiliza como de tracción y contribuye a frenar al tren. El motor de c.d. se convierte en generador de c.d. , efecto conocido como freno dinámico reostático. Se llama freno "dinámico" porque e motor se vuelve dínamo. El nombre de "reostático" se refiere a que la energía del generador se disipa en resistencias o reóstatos.

## *Bibliografía*

Sanjurjo Navarro, Rafael;  
"Máquinas Eléctricas"  
Ed. McGraw-Hill, 1989

Kosow, Irving L.;  
"Máquinas Eléctricas y Transformadores"  
Ed. Reverté, 1982

Liwschitz-Garik, Michael;  
C. Whipple, Clyde;  
"Máquinas de Corriente Continua"  
Ed. C.E.C.S.A.

Rebora, Gino;  
"La Construcción de Máquinas Eléctricas"  
Ed. Hoepply  
Editorial Científico-Médica

Teuchert, Hans;  
"Fuerza Motriz y Tracción Eléctrica"  
Ed. Labor  
La escuela del Técnico Electricista, TomoXI

Walter N. Alerich;  
"Control de Motores Eléctricos"  
Ed. Diana  
Manuales Delmar de Electricidad y Electrónica

Siskind, C.S.;  
"Direct-Current Machinery"  
McGraw-Hill, 1952