

24: 98



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**ANALISIS DE LA PROBLEMATICA EN LA
UNIDAD DE TRACCION PARA
AUTOMOVIL ELECTRICO**

T E S I S

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

P r e s e n t a n

JOSE LUIS PEÑA CANSECO

FERNANDO BARILLAS CORONA

México, D. F.

1981



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

I N D I C E

Pág.

INTRODUCCION

CAPITULO I

MECANICA DEL MOVIMIENTO DEL AUTOMOVIL

- 1.1. Cinemática de la rueda del automóvil
- 1.2. Dinámica de las ruedas del automóvil
- 1.3. Fuerzas y momentos que actúan so
bre el automóvil
- 1.4. Resumen de fuerzas que actúan so
bre el automóvil

CAPITULO II

CRITERIOS DE SELECCION DE LOS PARAMETROS DEL MOTOR

- 2.1. Selección de la potencia del motor

CAPITULO III

CARACTERISTICAS DE LOS MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

- 3.1. Función de aproximación de Froelich
- 3.2. Determinación de la curva de saturación en vacío

- 3.3. Fuerza electromotriz del motor con carga
- 3.4. Par electromagnético
- 3.5. Respuesta de la máquina de C.D. como motor
- 3.6. Transición en la operación de la máquina de C.D.
- 3.7. Motor con excitación independiente
- 3.8. Motor con excitación en derivación
- 3.9. Motor con excitación en serie

CAPITULO IV

OPCIONES DE CONTROL PARA EL MOTOR DE C.D.

- 4.1. Criterio de selección
- 4.2. Control electrónico de motores de --
C.D.
- 4.3. Características de los semiconductores de potencia
- 4.4. Tipos de semiconductores de potencia
- 4.5. Control Chopper
- 4.6. Control de tipo eléctrico

CAPITULO V

PRUEBAS DE LABORATORIO

- 5.1. Determinación de la curva de satura-

ción en vacío

5.2. Obtención de los parámetros de la ecuación de Froelich

5.3. Determinación y análisis de las curvas de par (T_e) contra velocidad (ω)

5.4. Ejemplo de aplicación: para la obtención de la potencia del motor

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

I N T R O D U C C I O N

Para la propulsión del automóvil han sido utilizados varios tipos de motores que se conocían y se conocen -- actualmente, siendo el de combustión interna el más utilizado.

Al final del siglo XIX en Francia se comenzaron -- las pruebas referentes a la aplicación del motor eléctrico-- para propulsar el automóvil; en los años siguientes aumento el dominio del motor de combustión interna y en los automóviles producidos actualmente es el motor más utilizado.

Debido a que el motor de combustión interna pre--senta toda una serie de desventajas, siendo una de las principales el efecto nocivo que producen los gases de escape, -- por lo cual desde hace varios años se realizan pruebas para la aplicación del motor eléctrico en el automóvil.

La aplicación masiva de el motor eléctrico presenta numerosas dificultades de construcción, de tecnología y -- en muchos de los casos exige la solución de gran cantidad -- de problemas teóricos y además de ésto, en la actualidad no es posible asegurar que los gastos relacionados con la fa--bricación de este tipo de motores cubrirán los beneficios -- de la aplicación de estos para la propulsión del automóvil.

En los capítulos siguientes expondremos en forma general la mecánica del movimiento del automóvil; así como también proponemos un análisis del motor de C.D. para su -- aplicación en el sistema de tracción de vehículos.

C A P I T U L O I

MECANICA DEL MOVIMIENTO DEL AUTOMOVIL

Uno de los primeros adelantos técnicos más importantes en este siglo, ha sido el automóvil, o en general to dos los vehículos automotores.

El automóvil, como otros de los adelantos de nues tra era, ha sido perfeccionado constantemente hasta conver-- tirse en lo que actualmente conocemos.

Para llegar a lo que es, a tenido que ser estudia do, para un aprovechamiento mejor de todas las partes que - lo componen .

En la mecánica del movimiento del automóvil inter vienen muchos factores, como la fricción de las ruedas, la resistencia de aire etc. Por lo tanto es necesario hacer un estudio de la dinámica del movimiento, comenzando por las -- ruedas.

1.1. Cinemática de la Rueda del Automóvil.

El movimiento de las ruedas del automóvil, es pro vocado por la aplicación de un par sobre las mismas, que se puede descomponer en una fuerza paralela al camino aplicada sobre el eje de las ruedas, en un vehículo donde tiene 4 --

ruedas y dos de ellas son las impulsoras y las otras 2 son las conductoras reciben el nombre de motrices y libres respectivamente.

Para el caso de las ruedas motrices el par aplicado a las mismas, hace surgir una fuerza en la periferia de la rueda que es una fuerza tangencial y se denomina fuerza tractiva. La existencia de esta fuerza hace aparecer una reacción, donde esta hace posible la translación del vehículo.

En los automóviles actuales se utilizan generalmente ruedas con engomado neumático, las cuales tienen una gran elasticidad. Bajo esta circunstancia tendremos que considerar que el radio de la circunferencia de la rueda, no es el radio efectivo de rodamiento puesto que hay una cierta deformación, bajo la parte de la carga del vehículo que descansa o se apoya sobre ella, por lo tanto el radio efectivo será un poco menos y se le llama radio de rodadura (r_t)

La velocidad tangencial sino hubiera deformación se puede calcular, mediante la siguiente ecuación:

$$V = \omega r \quad \text{-----} \quad 1.1$$

r = radio de la circunferencia de la rueda (m).

ω = velocidad angular de la rueda (rad/s).

v = velocidad tangencial (m/s).

Y la aceleración vendría dada por:

$$A = r \cdot \omega^2 \text{ ----- 1.2.}$$

a = aceleración tangencial en (m/s²).

Estas ecuaciones son aplicables al análisis de -- una rueda que se mueve sin patinaje. En la realidad es más frecuente la traslación del vehículo, con patinaje de las -- ruedas.

Para este caso la ecuación de la velocidad tangencial, será la siguiente:

$$V = \omega \sqrt{r^2 + r_t^2 + 2 r_t \cdot r \cdot \cos \varphi} \text{ ----- 1.3.}$$

Donde: a = aceleración

r = radio de la circunferencia de la rueda

r_t = radio de rodadura de la rueda

φ = ángulo del radio r_t , con respecto del eje -- vertical de la rueda

Al 1er. caso en donde la rueda se mueve sin patinaje se le conoce como velocidad teórica (Vteo.)

El patinaje de la rueda se definirá como la relación entre la velocidad del patinaje (Vs) y la velocidad -- teórica (Vteo), generalmente el patinaje es expresado en -- porcentaje.

$$S = \frac{V_s}{V_{teo}} \times 100 = \frac{V_{teo} - V}{V_{teo}} \times 100 \text{ ----- } 1.4.$$

La eficiencia del patinaje (N_s) puede ser evaluado mediante la siguiente expresión.

$$N_s = 1 - S = \frac{V_s}{V_{teo}} \text{ ----- } 1.5.$$

Si descomponemos la aceleración en sus componentes normal y radial será:

$$A_{xa} = dv_{xa}/dt = r1. \omega^2. \text{ sen } \varphi \text{ ----- } 1.6.$$

$$A_{ya} = dv_{ya}/dt = r1. \omega^2. \text{ cos } \varphi \text{ ----- } 1.7.$$

1.2. Dinámica de las Ruedas del Automóvil.

Al analizar la dinámica de las ruedas del automóvil se ven diferentes casos atendiendo a la rigidez de la superficie sobre donde se mueve la rueda, y a su propia rigidez. Para nuestro caso, puesto que la rigidez de la rueda es mínima con respecto de la superficie por donde se mueve, analizaremos el caso de la rodadura de una rueda elástica sobre una superficie rígida.

Otra cosa que omitiremos en este estudio será el par de fricción que hay en los cojinetes de las ruedas, por su mínimo valor.

Las fuerzas y momentos que actúan sobre una rueda elástica más importantes son:

G_s = carga vertical sobre la rueda libre, considerando su propio peso

P = fuerza horizontal que provoca el movimiento de la rueda

P_{br} = fuerza de inercia de la rueda debido al movimiento no iniforme de la misma

M_{br} = momento debido a la inercia de la rueda, -- cuando la misma se mueve con movimiento no -- uniforme

R_x = componente horizontal de la reacción del camino

R_y = componente vertical de la reacción del camino

La fuerza de inercia se puede determinar mediante la ecuación 1.2.1.

$$P_{br} = M \cdot a \quad (\text{Kg}) \quad \text{-----} \quad 1.2.1$$

m = masa de la rueda (Kg.-seg²/m)

a = aceleración de la rueda (m/s²)

El momento de inercia debido a la inercia de la -- rueda en movimiento, se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$M_{br} = I_k \cdot \alpha \quad (\text{KG m}) \quad \text{-----} \quad 1.2.3.$$

I_k = momento de inercia de la rueda (KG m - seg²)

α = aceleración angular de la rueda (seg - ²)

En la siguiente figura (1.2.1) se representan, -- las fuerzas y momentos que actúan sobre la rueda elástica, - la cuál rueda libremente por una superficie.

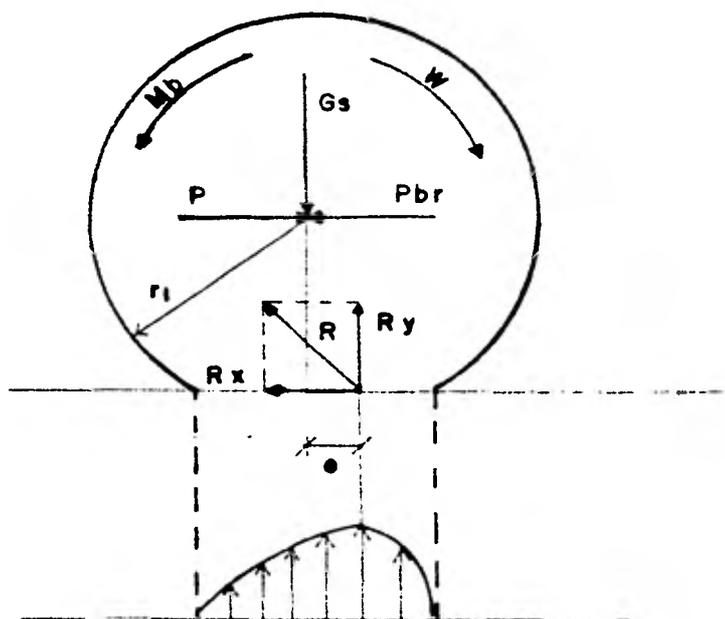


FIG. 1.2.1.

Si sumamos todas las fuerzas que actúan en el eje vertical y horizontal, tendremos:

$$P - Pbr - Rx = 0 \text{ ----- } 1.2.4$$

$$Gs - Ry = 0 \text{ ----- } 1.2.5$$

La ecuación de los momentos que actúan con respecto al punto O de la rueda es:

$$- Mbr + Rx \cdot r_d - Ry \cdot e = 0 \text{ ----- } 1.2.6$$

r_d = radio dinámico de la rueda.

e = distancia del punto de aplicación de la ---

reacción resultante del camino al eje vertical de la rueda. (m).

El producto R y e el cual es igual al momento de resistencia al rodamiento, generalmente se denomina por M_{wt} .

Si consideramos que la rueda, se mueve con velocidad angular constante, se puede llegar después de varias transformaciones a la siguiente ecuación.

$$R_x = Wt = G_s \cdot \frac{e}{r_d} \text{ ----- } 1.2.7$$

La relación e/r_d se define como el coeficiente de resistencia al rodamiento y se designa por f .

En la realidad la rueda no se mueve libremente -- por la superficie del terreno, sino que se presentan fuerzas y movimientos que en la siguiente figura (1.2.2) se representan.

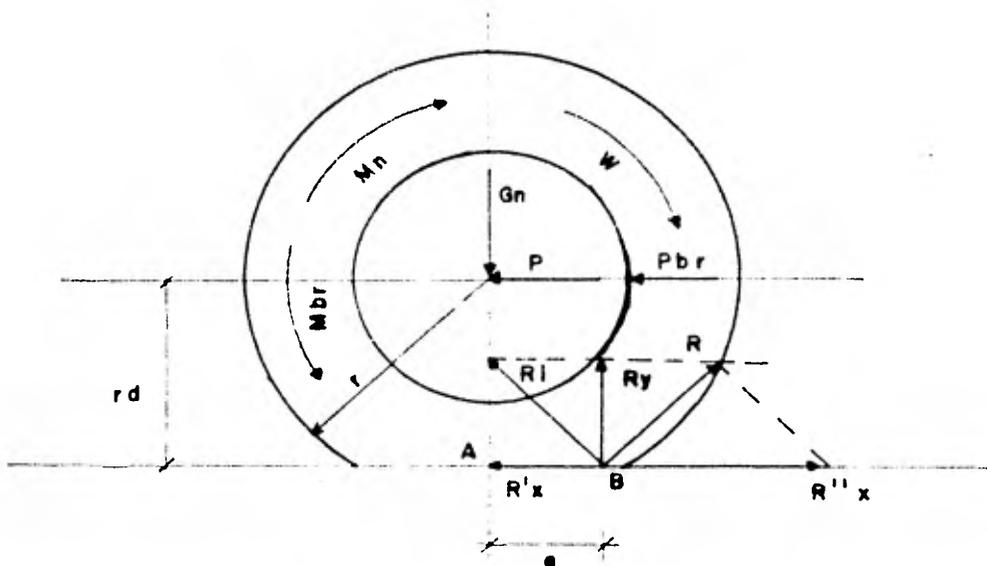


FIG. 1.2.2.

P - reacción sobre el eje de la rueda motriz la cual contempla la fuerza de resistencia al rodamiento de las ruedas libres.

Pbr fuerza de inercia de la rueda debida al movimiento no uniforme de la misma

Mn - Par de propulsión de la rueda

Mbr - momento debido a la inercia de la rueda

- reacción resultante del camino

- carga vertical sobre la rueda sobre la rueda motriz, considerando su propio peso.

La acción resultante del camino esta representada por la fuerza R , la cual se puede descomponer en otras dos fuerzas una R' , radial y, otra paralela al camino R'' que es la reacción debida al par motriz aplicado a la rueda.

Esta fuerza de reacción, es la fuerza tractiva y se designa por el simbolo Pn y se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$R''_x = P_n = \frac{M_n - M_{br}}{rd} \text{ ----- } 1.2.8$$

Si proyectamos todas las fuerzas respecto al eje horizontal y planteamos todos los momentos, con respecto al eje de giro de la rueda, obtendremos el siguiente sistema -

de ecuaciones.

$$- P - P_{br} - R'x + R''x = 0$$

$$G_n - R_y = 0 \text{ ----- } 1.2.9$$

$$- M_{b2} + M_n - R''x \cdot r_d = 0$$

Para el caso del movimiento uniforme de la rueda, tendremos que $M_{br} = 0$ y $P_{br} = 0$ y por lo tanto las ecuaciones anteriores se reducen a:

$$- P - R'x + R''x = 0$$

$$G_n - R_y = 0 \text{ ----- } 1.2.10$$

$$M_n - R''x \cdot r_d = 0$$

Con este sistema de ecuaciones se puede determinar, la resistencia al rodamiento W_t .

$$R'_x = W_t = \frac{M_n}{r_d} - P \text{ ----- } 1.2.11$$

Otro parámetro muy importante es el coeficiente de resistencia al rodamiento $W_t = R'_x$ y la fuerza G_n

Una forma de evaluar este coeficiente F sería:

$$F = \frac{W_t}{G_n} = \frac{e}{r_d} \text{ ----- } 1.2.13$$

Si de la primera ecuación, de las ecuaciones ---- (1.2.9), despejamos a $R_x = P_n$ y multiplicamos por la velocidad (W), tendremos todas las potencias que actúan en el movimiento de la rueda.

$$M_n \cdot W = W_t \cdot W + M_{b1} \cdot W + P_{b2} \cdot W + P \cdot W \approx 1.14$$

donde $M_n \cdot W$ es la potencia transmitida a la rueda.

$W_t \cdot W$ = potencia que se pierde en la deformación del neumático y en vencer las fuerzas de fricción.

$M_{b1} \cdot W, P_{b2} \cdot W$ = potencias consumidas en vencer las fuerzas de inercia.

$P \cdot W$ = potencia entregada al vehículo para su movimiento.

Para determinar todos los factores, que intervienen, para afectar los valores de e y r_d , sería imposible, debido a esta el coeficiente de resistencia al rodamiento se determina mediante trabajos experimentales. Estos trabajos pueden realizarse en bancos, o en pruebas de carretera.

La dependencia entre el coeficiente de resistencia al rodamiento de un neumático, y la velocidad de movimiento del mismo se determina mediante diversas ecuaciones empíricas. Una de ellas demostrada por Hahn, para un tipo determinado de un neumático es la siguiente:

$$f = \frac{0.019}{v P_k^2} + \frac{0.00245}{v P_k^1} \left(\frac{V}{100}\right)^2 + \frac{0.00420}{\sqrt{P_k^4}} \left(\frac{V}{100}\right)^3$$

P_k = presión en el neumático (Kg/cm²)

V = velocidad de traslación del neumática (Km/hr)

El diseño del neumático influye en gran medida so
bre el coeficiente de resistencia al rodamiento. No nos me-
teremos en el análisis del diseño del neumático, puesto que
esta podría ser todo un libro.

Anteriormente vimos algunos de los factores que -
influyen en el valor del coeficiente de resistencia al roda-
miento f . además vimos que es imposible calcular exactamen-
te la influencia de todos los parámetros que determinan el
valor de f , por lo tanto, hasta el presente se determina el
coeficiente de resistencia al rodamiento mediante la experi-
mentación de un automóvil para diferentes condiciones de ca-
mino. La ecuación final en base a la cual determinaremos el
coeficiente de resistencia al rodamiento del automóvil es -
la siguiente:

$$f = \frac{W_t}{G} \text{ ----- } 1.2.15$$

W_t - fuerza de resistencia al rodamiento del au-
tomóvil (KG)

G - peso del automóvil para la cual fue medida
 W_t (KG)

En la siguiente tabla se muestran los valores del
coeficiente de resistencia al rodamiento del automóvil, pa-
ra distintos tipos de caminos.

TIPO DE CAMINO	f
hormigón	0.010 - 0.020
asfalto	0.012 - 0.022
adoquines	0.015 - 0.025
empedrado	0.025 - 0.060

TABLA No. 1

1.3 Fuerza y Momentos que Actúan sobre el Automóvil.

En la siguiente figura (1.3.1) se muestran las -- fuerzas y momentos que actúan sobre un automóvil que se mueve por una pendiente con velocidad variable V .

Las ruedas son las del eje trasero, y el par motor se designa por M_n .

Los restantes simbolos de la figura son:

G - peso del automóvil equipado completamente

h_s, a, b - coordenados del centro de gravedad del automóvil

R_{yp}, R_{yt} - reacciones perpendiculares del camino que actúan sobre las ruedas del eje delantero y trasero

W_{tp}, W_{tt} - fuerzas de resistencia al rodamiento de las ruedas del eje delantero y trasero

- W_p - fuerza resultante de la resistencia del aire
 h_p - coordenada que determina la posición de la fuerza W_p
 P_b - fuerza total de inercia que existe en el caso del movimiento no uniforme del automóvil
 r_d - radio dinámico de las ruedas
 ω - velocidad angular de las ruedas
 P_n - fuerza tractiva
 α - ángulo de inclinación del camino

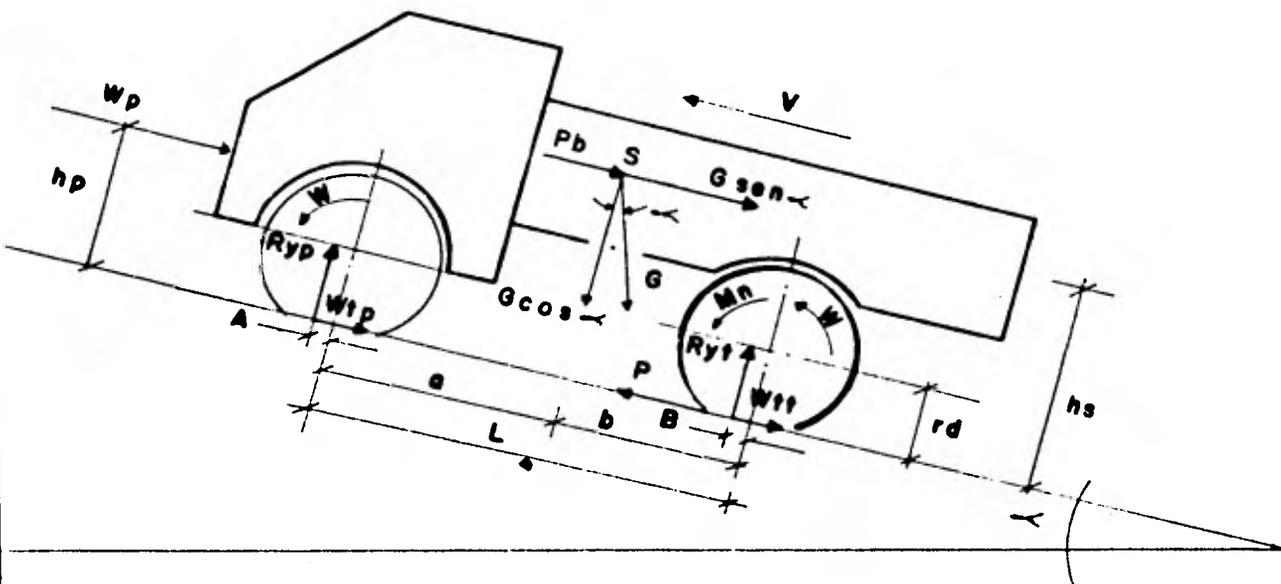


FIGURA 1.3.1

Fuerza de Inercia como Resistencia al Movimiento.

La fuerza de inercia en el movimiento del automóvil aparece cuando la variación de la velocidad con respecto del tiempo es diferente a cero.

$$\frac{dv}{dt} \neq 0. \text{-----} 1.3.1$$

Esta fuerza de inercia se puede dividir en dos -- partes, primero en cuanto al movimiento de translación de toda la masa del vehículo, la cual se encuentra en movimiento de avance.

Esta fuerza será representada por P'b, mediante la siguiente ecuación.

$$P'b = \frac{G}{g} \cdot \frac{dv}{dt} \text{-----} 1.3.2$$

La segunda parte se refiere a las masas, que aparte de estarse moviendo para su translación se encuentran en movimiento de rotación.

La relación de transmisión en el sistema de transmisión del automóvil se considerará como, la relación entre la velocidad angular de la pieza conducida de la conductora.

La relación de transmisión total i_c , del automóvil se determina por:

$$i_c = \frac{W}{W_s}$$

W - velocidad angular de la rueda del automóvil

W_s - velocidad angular de la flecha principal del motor

Otro momento que tiene trascendencia en el movi--

miento, es el de las masas giratorias del motor, al ser reducido al eje de la rueda motriz $M''b$ será igual a:

$$M''b = \frac{I_s}{i_c^2} \cdot \frac{dw}{dt} \text{ -----1.3.3}$$

donde I_s = momento de inercia de las masas del mecanismo biela-manivela, las cuales se encuentran en movimiento giratorio (KGm - Seg²)

La fuerza en la periferia de la rueda, equivalente a este momento será:

$$P''b = M''b = \frac{1}{rd} \cdot \frac{I_s}{i_c^2} \cdot \frac{dw}{dt} \text{ ----- 1.3.4}$$

La fuerza debido a las masas giratorias del sistema de transmisión, se puede evaluar mediante la siguiente expresión.

$$P_b'' = \frac{M_b''}{rd} = \frac{1}{rd} \cdot \frac{dw}{dt} (I_{kp} + I_{kt} + \sum_i^n \frac{I_{n^2}}{i_n^2}) \text{ --1.3.}$$

en donde:

I_{kp}, I_{kt} - momento de inercia de las ruedas delanteras y traseras del automóvil - - - -
(KGm - se²).

I_n - momento de inercia de una parte cualquiera n del sistema de transmisión -- con respecto a su propio eje de giro -
(KGm - seg²).

$\dot{i}_n = \frac{W}{W_n} W_n$ - velocidad angular de una parte cualquiera n en el sistema de transmisión.

Debido a que la dirección de todas las fuerzas, es la misma, podemos sumar algebraicamente las expresiones que las definen y de esa forma obtendremos la fuerza total de inercia P_b .

$$P_b = P_b + P''_b + P'''_b$$

Si sustituimos en la ecuación 1.3.6 las ecuaciones 1.3.2, 1.3.4, 1.3.5 y haciendo:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{r_d} \cdot \frac{dV}{dt}$$

tendremos:

$$P_b = \frac{dV}{dt} \cdot \left[\frac{G}{g} + \frac{1}{r_d^2} \cdot \frac{I_s}{I_c} + (I_{kp} + I_{kt} + \sum_1^n \frac{I_n}{2_n} \cdot \frac{1}{g}) \frac{g}{G} \right]$$

Si definimos el parámetro S como el coeficiente de las masas reducidas.

$$S = 1 + \frac{1}{r_d^2} \cdot \frac{I_s}{I_c} \cdot \frac{g}{G} + \frac{1}{r_d^2} \cdot (I_{kp} + I_{kt} + \sum_e^n \frac{I_n}{i_n^2}) \cdot \frac{g}{G}$$

tendremos:

$$P_b = \frac{G}{g} \cdot \delta \cdot \frac{dV}{dt} \quad \text{-----} \quad 1.3.6$$

La ecuación 1.3.6 determina la fuerza total de --

inercia del automóvil, por ejemplo durante la aceleración o durante el frenado cuando el sistema de transmisión del automóvil no se ha desconectado del volante del motor.

Resistencia del Camino:

La resistencia que presenta el suelo al movimiento del automóvil, debido a las fuerzas de fricción y a la pendiente del camino se llama fuerza de resistencia al rodamiento, la podemos calcular mediante la siguiente expresión

$$W_t = G \cdot f \text{ ----- } 1.3.7$$

y si la descomponemos en dos partes, una para el eje delantero y otra para el eje trasero.

$$W_{tp} = G_p \cdot f_p \quad W_{tt} = G_t \cdot f_t \text{ ----- } 1.3.8$$

$$W_t = W_{tp} + W_{tt} \text{ ----- } 1.3.9$$

donde: G_p y G_t = Partes del automóvil que soportan las ruedas del eje delantero y eje trasero

f_p y f_t = coeficiente de resistencia al rodamiento del eje delantero y de las ruedas del eje trasero.

Si el móvil se está desplazando, sobre una superficie la cual guarda una cierta inclinación con un ángulo determinado, la resistencia del camino W_d se puede expresar de la siguiente forma.

$$Wd = G. (f \cdot \cos \alpha + \text{sen } \alpha). \text{ ----- } 1.3.9$$

La magnitud $\psi = (f \cdot \cos \alpha + \text{sen } \alpha)$ la llamamos: coeficiente de resistencia del camino

En condiciones normales, la pendiente se determina en por ciento. El valor de la pendiente la podemos ejemplificar, mediante la siguiente figura:

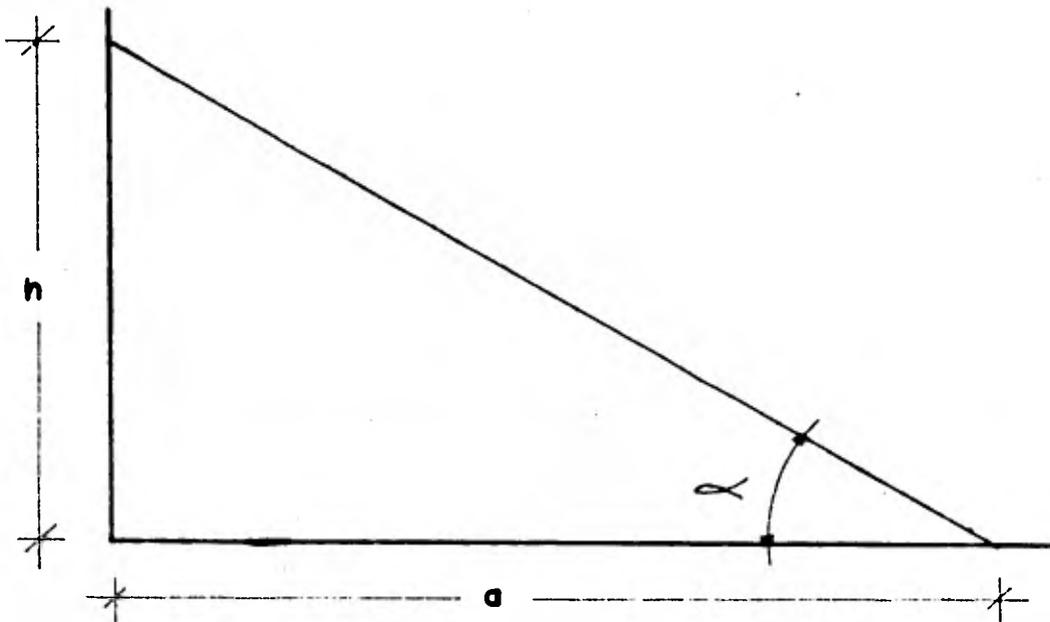


FIGURA No. 1.3.2

$$\text{Tan } \alpha = f + \frac{P(\%)}{100}.$$

En condiciones normales las pendientes de los caminos de pavimentos rígidos no sobrepasan el valor del 15%, y por lo tanto podemos emplear para calcular el coeficiente de resistencia al rodamiento la siguiente expresión.

$$\psi = f + \frac{P(\%)}{100} \text{ ----- } 1.3.10$$

Resistencia del Aire

Sobre la superficie exterior del automóvil actúa una fuerza debido a su desplazamiento dentro de la atmósfera terrestre la cual se llama resistencia del aire. La fuerza de resistencia del aire W_p se calcula en la dirección -- del movimiento del automóvil y su sentido es contrario al -- de la velocidad del mismo.

Para diferenciarla de otras fuerzas diremos que -- es la fuerza frontal del aire mediante la siguiente expresión la podemos evaluar por:

$$W_p = C. \frac{\rho}{2g} \cdot F \cdot \left(\frac{V}{3.6}\right)^2 \text{ ----- } 1.3.11$$

donde: V = velocidad del automóvil (km/nr)

C = coeficiente de resistencia frontal del aire

ρ = peso específico del aire (kg/m^3). Podemos asumir que $\rho = 1.25 \text{ Kg}/\text{m}^3$

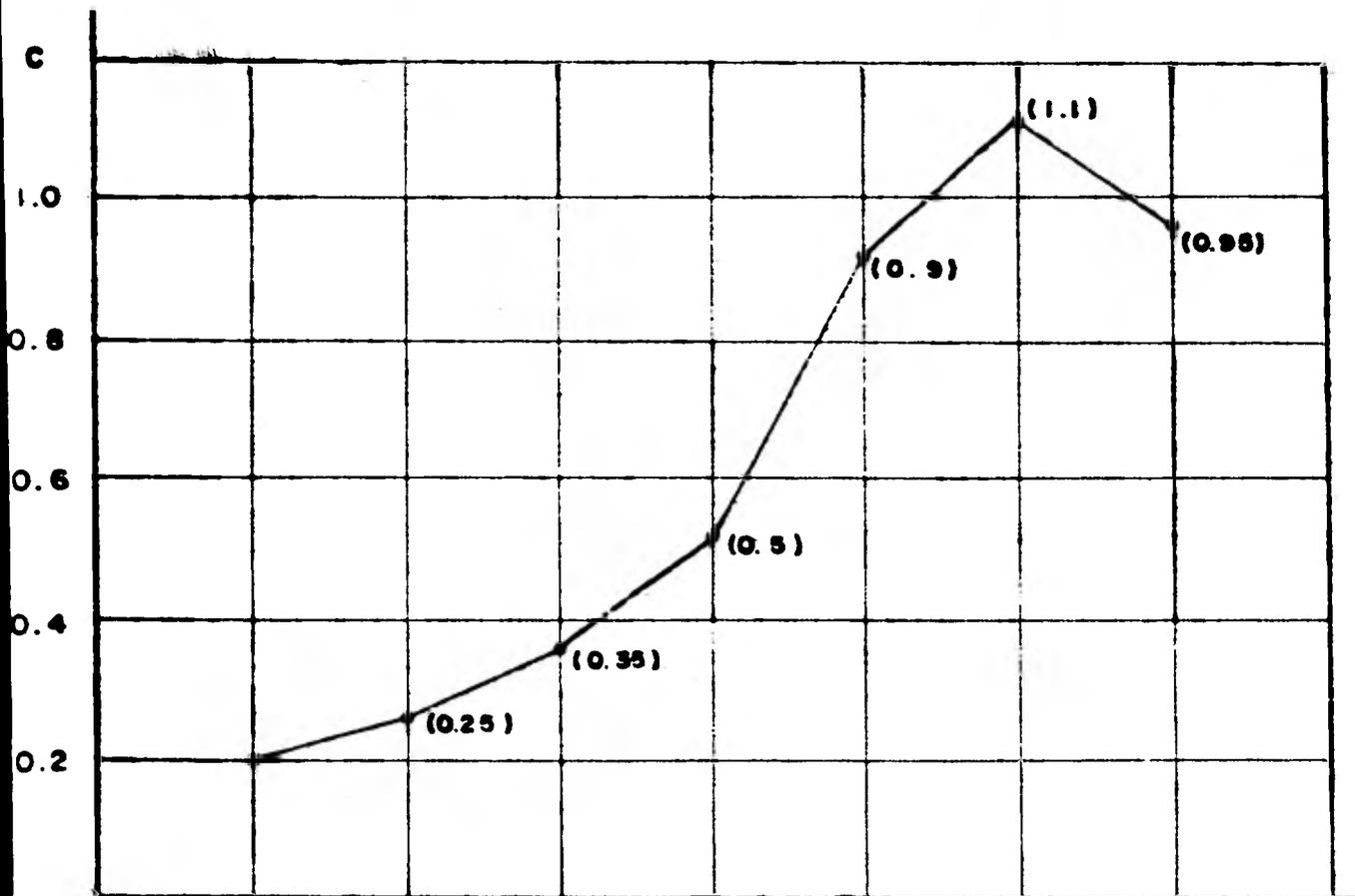
F = superficie de la proyección del vehículo sobre un plano perpendicular a su eje longitudinal. (m^2)

Después de sustituir los valores numéricos en la ecuación llegamos a:

$$W_p = 0.00492C. F. V^2 \text{ ----- } 1.3.12$$

La fuerza de resistencia del aire, actúa al centro de la superficie proyectada F en forma perpendicular al plano de dicha superficie

En el siguiente gráfico mostramos los valores del coeficiente C para distintos tipos de carrocerías de vehículos automotores.



La superficie F se puede calcular con suficiente exactitud mediante la ecuación.

$$F = m \cdot B \cdot H \text{ ----- } 1.3.13$$

donde:

m = coeficiente de llenado del área, tomando así- siempre el valor de 0.95

B = vía del automóvil (M)

H = altura máxima del automóvil. (M)

Podemos concluir que la resistencia del aire W_p es proporcional al cuadrado de la velocidad del automóvil.

Reacción del Camino.

Como reacción del camino denominaremos a la componente vertical de la reacción total del camino R_y , la cual actúa sobre el automóvil.

De acuerdo con análisis ya efectuados, en la dinámica de la rueda podemos escribir que:

$$R_{yp} = G_p$$

$$R_{yt} = G_t \text{ ----- } 1.3.14$$

En el caso en que el automóvil está detenido en un camino horizontal. R_{yp} y R_{yt} están determinadas por:

$$R_{yp} = \frac{G \cdot b}{L} \text{ ----- } 1.3.15$$

$$R_{yt} = \frac{G \cdot a}{L} \text{ ----- } 1.3.16$$

Fuerza Tractiva

De acuerdo con la definición considerada, la fuerza tractiva es la componente de la reacción del camino, paralela al mismo y que actúa en la rueda motriz. Es esta la fuerza que provoca el movimiento de avance del automóvil.

La magnitud de la fuerza de tracción puede ser -- calculada mediante la siguiente expresión:

$$R''_x = P_n = \frac{M_n}{r_d} \text{ ----- } 1.3.17$$

El Par de propulsión M_n llevado hacia las ruedas motrices puede ser calculado según la ecuación 1.3.18

$$M_n = M \cdot \frac{\eta_o \cdot \eta_s}{i_c} \text{ ----- } 1.3.19$$

donde: η_o = eficiencia total, la cual considera las pérdidas de potencia en el sistema de transmisión

η_s = eficiencia del patinaje

i_c = relación de transmisión total del sistema de transmisión

M = Par del motor

Fuerza de Adherencia

La fuerza de adherencia es el producto de la car-

ga vertical sobre la rueda G_s a G_n y el factor de adherencia (μ).

La fuerza de adherencia es la máxima fuerza tangencial que puede la rueda transmitir al camino. Las ecuaciones que determinan la fuerza de adherencia en el caso de la rueda motriz y la rueda conductora serán:

$$P_{\mu s} = G_s \cdot \mu \text{ ----- 1.3.20} \quad P_{\mu n} = G_n \cdot \mu \text{ ----- 1.3.21}$$

El movimiento con rodadura pura de la rueda libre será posible solamente cuando la fuerza que provoca su movimiento

$$P \leq P_{\mu} = G_s \cdot \mu$$

En el caso contrario ocurre el deslizamiento de la rueda

Un caso similar ocurre con la rueda motriz. La máxima fuerza tractiva que puede transmitirse hacia el camino debe cumplir la siguiente condición

$$P_n \leq P_{\mu} = G_n \cdot \mu$$

Cuando esta condición no se cumple, ocurre el patinaje de la rueda

La magnitud del coeficiente de adherencia de una rueda elástica con el camino depende de los siguientes fac-

tores.

- Tipo de camino y su estado
- Tipo de neumático y estado de su banda de rodamiento
- Presión de aire en el neumático de la rueda
- Patinaje de la rueda al moverse
- Velocidad de movimiento de la rueda
- Grado de uniformidad de la transmisión de fuerza hacia el camino

Los valores aproximados de los coeficientes de adherencia de la rueda con la superficie blanda se dan en la tabla No. 2

VALORES MAXIMOS DEL COEFICIENTE DE LA ADHERENCIA
DE UNA RUEDA SOBRE UNA SUPERFICIE BLANDA

TIPO DE CAMINO	COEFICIENTE DE ADHERENCIA
Pavimento de arcilla seco y apizonado	0.8
Pavimento arenoso y apizo <u>n</u> nado	0.65
Pradera Humeda	0.5
Arena Seca	0.4
Fango	0.1

1.4. Resumen de Fuerzas que Actúan sobre el Automóvil

Si proyectamos sobre un eje paralelo al camino todas las fuerzas que actúan sobre el automóvil, figura ---

1.3.1. obtendremos la siguiente ecuación:

$$P_n - (W_{tp} + W_{tt}) - G \cdot \sin \alpha - W_p - P_b - P_b = 0. \quad \text{--- 1.4.1}$$

si consideramos que:

$$W_{tp} + W_{tt} = W_t = G \cdot P \cdot \cos \alpha ;$$

tendremos:

$$P_n - W_d - W_p - P_b = 0. \quad \text{----- 1.4.2}$$

Si en la ecuación 1.4.2 sustituimos la ecuación 1.3.6 por su expresión e introducimos el coeficiente de las masas reducidas (δ). y definimos el factor dinámico del automóvil y mediante la siguiente expresión.

$$D = \frac{P_n}{G} \quad \text{----- 1.4.3.}$$

Siguiendo con sustituciones y transformaciones matemáticas de las ecuaciones, llegaríamos a la siguiente expresión.

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{1}{g} \cdot \left[D - (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + \frac{W_p}{G} \right] \quad \text{----- 1.4.4}$$

Con esta ecuación 1.4.4 resultante podremos obtener por ejemplo las pendientes máximas que puede vencer el automóvil.

Si consideramos en la ecuación 1.4.4 las condiciones que permiten vencer las máximas pendiente, es decir, el movimiento a pequeña velocidad constante, tendremos:

$$D = f \cdot \cos \alpha + \text{sen} \alpha$$

y además que

$$\text{Sen} \alpha_{\max} \approx b - f.$$

También utilizando, la ecuación 1.4.4 podemos calcular la aceleración máxima, que puede alcanzar el automóvil. La aceleración máxima se dará cuando el automóvil se mueva sobre una superficie horizontal o sea que $\alpha = 0$ y sobre las ruedas actuando la máxima fuerza tractiva, si suponemos en un automóvil que las ruedas motrices son las del eje trazero implicará que la fuerza tractiva máxima será -- igual a la fuerza adherencia que es igual a:

$$P_n = Gt \cdot \mu = Ryt \cdot \mu$$

Tomando en cuenta estas suposiciones y claculando Ryt, mediante la ecuación 1.3.16. Posteriormente calcularemos la fuerza de adherencia cuyo valor comparamos con la -- fuerza tractiva y sustituimos en la ecuación 1.4.4, después

de realizar las transformaciones tendremos:

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{\max} = g \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\mu - (a/L) - f}{1 - \mu (hs/L)} \text{ ----- 1.4.5}$$

Con la ecuación 1.4.5. podemos calcular la máxima aceleración del vehículo, quedando así definido uno de sus parámetros principales, para su diseño.

C A P I T U L O I I

CRITERIOS DE SELECCION DE LOS PARAMETROS DEL MOTOR

Como resultado de los análisis anteriores, existe una estrecha relación, entre las características tractivas del automóvil y las características del motor.

La solución correcta de las características del motor del automóvil debe ser analizada desde el punto de vista de las propiedades tractivas que debe cumplir el automóvil para su correcto funcionamiento

Entre los parámetros más importantes que analizaremos del motor estan:

- Valor de la potencia máxima
- = Rapidez del motor

Debido a que todas las fuerzas de resistencia al movimiento, son paralelas a la dirección de movimiento del automóvil. Si multiplicamos el valor de estas fuerzas por la velocidad, del automovil obtendremos para cada caso la magnitud de la potencia necesaria para vencer la resistencia al movimiento, o sea, la potencia de las resistencias al movimiento (No. p).

Si expresamos la velocidad (V) del automóvil, en Km/Hr y la potencia de las resistencias en CV, obtendremos la siguiente expresión:

$$N_{op} = \frac{W \cdot V}{270} \text{ -----(2.1) donde: } V = \text{velocidad del automóvil}$$

$W = \text{fuerzas de resistencia al movimiento}$

Sustituyendo W por las expresiones para las diferentes fuerzas de resistencia al movimiento, obtendremos.

- Potencia de resistencia al rodamiento (Nwt).

$$N_{wt} = \frac{G \cdot f \cdot \cos \alpha}{270} \cdot V \text{ ---- (2.2)}$$

- Potencia de resistencia a la inclinación del camino (Nww).

$$N_{ww} = \frac{G \cdot \text{Sen} \alpha}{270} \cdot V \text{ ---- (2.3).}$$

- Potencia de resistencia al aire. (Nwp).

$$N_{wp} = \frac{0.0049 \text{ C.F.}}{270} \cdot V^3 \text{ ---- (2.4).}$$

Si atendemos a las pérdidas de potencia que no dependen de la velocidad, como son las del sistema de transmisión, su magnitud la podemos calcular de acuerdo al tipo de transmisión que utilicemos.

En un vehículo convencional las pérdidas en el --

sistema de transmisión se encuentran en los siguientes puntos:

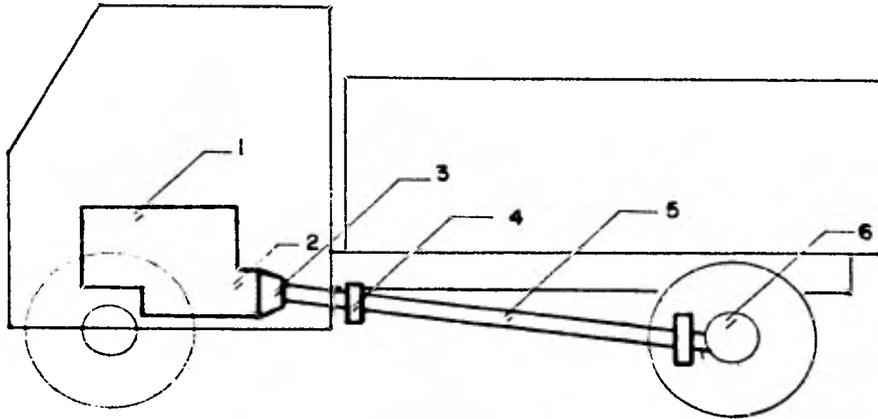


FIG. 2. 1.

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| 1.- Motor | 4.- Uniones cardán |
| 2.- Embrague de fricción | 5.- Barra de transmisión |
| 3.- Caja de velocidades | 6.- Puente trasero. |

Si esto lo expresamos en un diagrama de bloques - quedaría de la siguiente forma.

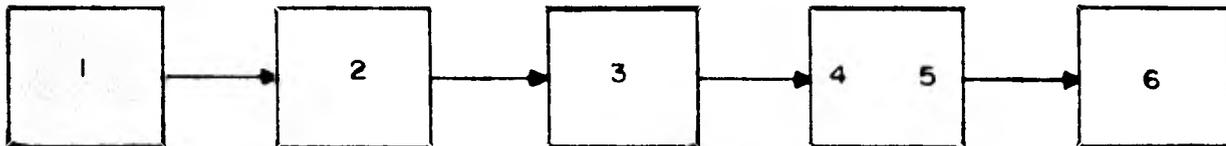


FIG. 2. 2.

La eficiencia total del sistema de transmisión es taría dada por la siguiente expresión

$$N_o = N_6 \cdot N_{5,4} \cdot N_3 \cdot N_2 \text{ -----(2.5)}$$

A continuación en la siguiente figura (2.3) mostramos una tabla con la eficiencia de potencia de varios elementos del sistema de transmisión.

Conjunto o elemento mecánico del sistema de transmisión	EFICIENCIA	
Embrague de fricción	0.995	
Pareja de ruedas	0.980	
Cojinetes de rodamiento en caja de velocidades	0.995	Fig. (2.3)
Unión cardán	0.995	
Par cónico normal	0.92 - 0.95	
hipoidal	0.96 - 0.98	

La magnitud de la potencia en las ruedas (N_k) que daría dada por la siguiente ecuación, (2.6)

$$N_k = N \cdot \eta_o \text{ ----- (2.6)}$$

donde:

N = potencia del motor

Para determinar la velocidad del automóvil en Km/Hr. utilizamos la siguiente ecuación.

$$V = 0.377 \cdot n \cdot rd \cdot i_c \text{ ----- (2.7)}$$

n = revoluciones por minuto del cigüeñal.

Si sumamos las potencias de resistencia al rodamiento y a la inclinación, obtendremos la potencia consumida por la resistencia del camino (N_{wd}).

$$N_{wd} = \frac{G \cdot V \cdot (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha)}{270} \quad \text{----- (2.8)}$$

La velocidad máxima (V_{max}) del automóvil se obtendrá cuando la potencia consumida por las resistencias al movimiento (N_{op}) $N_{op} = N_{wp} + N_{wd}$ se iguale al valor de la potencia N_k , para la cual corresponden la N_{max} del cigüeñal del motor.

Una forma de poder relacionar todas las potencias consumidas por las resistencias y perdidas, es mediante el índice de aprovechamiento (A).

$$A = \frac{G \cdot (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot V + 0.0049 \cdot C.F. \cdot V^3}{270 N} + (1 - N_o) \quad (2.)$$

N = potencia del motor

V = velocidad del automóvil

2.1. Selección de la Potencia del Motor

En la selección del valor de la potencia en las ruedas del automóvil tiene que ser considerado un factor fundamental; la velocidad máxima del automóvil.

Mientras mayor potencia máxima tenga el motor, el automóvil tendrá mejor habilidad de aceleración y mayor velocidad, considerando constantes los demás factores del ve-

hículo (peso total, eficiencia del sistema de transmisión, geometría del vehículo etc.).

La velocidad máxima del vehículo depende básicamente de dos factores, la potencia máxima del motor, y el peso total del vehículo.

La relación entre estos dos factores es muy importante puesto que se pueden evaluar las distintas aptitudes del automóvil

Para automóviles ligeros la relación entre el peso total del automóvil G_{max} , y la potencia máxima (N_{max}) del motor esta dada por la siguiente ecuación:

$$j_n = \frac{G_{max}}{N_{max}} \quad (\text{Kg/CV}) \quad \text{-----} \quad 2.1.1.$$

Esta relación se conoce con el nombre de peso específico.

Para los automóviles pesados la relación que se maneja es la inversa a la anterior

$$N_j = \frac{N_{max}}{0.001 G_{max}} \quad (\text{CV/Ton}) \quad \text{-----} \quad (2.1.2)$$

Esta relación se le conoce con el nombre de potencia específica.

Si suponemos invariables los parámetros principales del automóvil, tales como: peso total, dimensiones, po-

sición del centro de gravedad etc., podríamos afirmar que - el aumento de la potencia del motor, provoca el aumento de la velocidad máxima del automóvil.

Por otra parte no podemos aumentar en forma ilimitada la velocidad del automóvil esto se debe al fenomeno de la adherencia, en la siguiente gráfica.

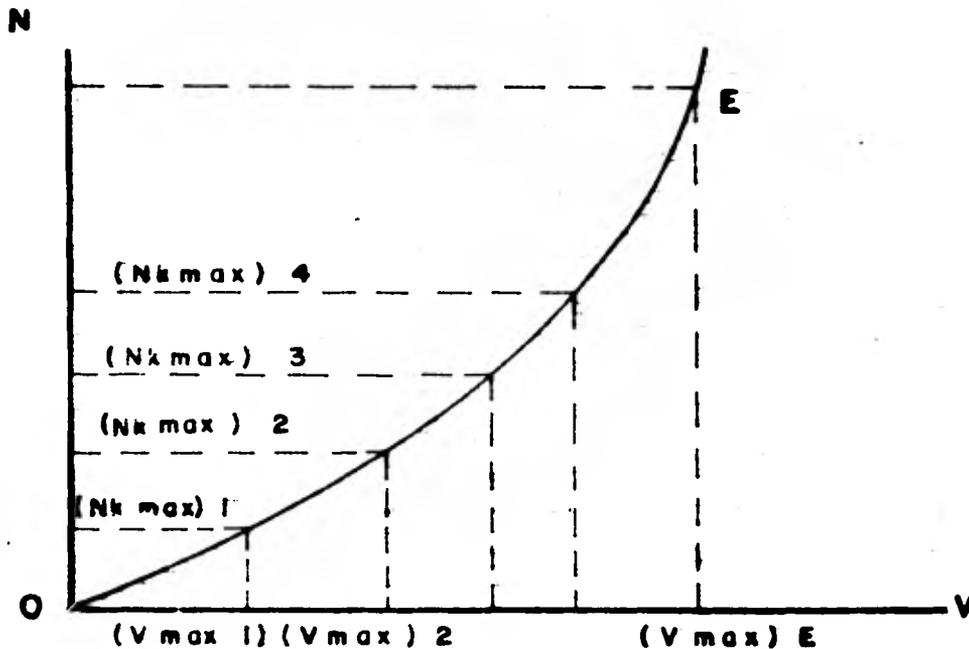


FIG. 2.1.1.

En la gráfica de la Fig. (2.1.1) la curva OE, representa la demanda de potencia en las ruedas motrices, necesarias para vencer las resistencias al movimiento, con un pequeño ángulo de inclinación del camino, donde su ecuación sería.

$$N_{wd} + N_{wp} = f(V). \text{ ----- (2.1.3)}$$

La recta OE representa el límite superior de potencia posible a aplicar a las ruedas debido al fenómeno de adherencia, y la ecuación que la determina es:

$$N_{gr} = \frac{P_{\mu} \cdot V}{270} \quad \text{-----} \quad 2.1.4$$

P_{μ} = fuerza de adherencia del automóvil

Por lo tanto para seleccionar el valor de la potencia máxima sobre las ruedas debemos conocer las coordenadas del punto de intersección, entre la curva de potencia demandada por las resistencias al movimiento, y la recta de potencia máxima $N_k \max$ sobre las ruedas motrices.

Para obtener la potencia máxima en las ruedas del vehículo, depende de los parámetros generales donde se está moviendo el automóvil.

Durante la etapa de proyecto la velocidad máxima de cada tipo de vehículo es un dato técnico principal. Por lo tanto, para determinar la potencia en las ruedas correspondientes al punto de intersección hay que decidir cuáles serán los parámetros de construcción como: peso total (G), dimensiones extensiones, coeficientes de resistencia frontal del aire (C), etc. En éste caso, el valor del coeficiente f , debe estar comprendido entre los límites de 0.010 a 0.015, y simultáneamente la pendiente será de 1% a 2%.

La potencia correspondiente al punto de intersección se puede calcular mediante la siguiente expresión.

$$N_{kv} = \frac{G. (f. \cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha)}{270} \cdot V_{\max} + \frac{0.0049 \text{ C.F.}}{270} V_{\max}^3 \quad (2.1.5)$$

La potencia que corresponde a la velocidad máxima del automóvil puede ser algo menor que la potencia máxima aplicada a las ruedas.

La relación entre la potencia que corresponde a la velocidad máxima y la potencia máxima sobre las ruedas la señalaremos por \mathcal{R} .

$$\mathcal{R} = \frac{N_{kv}}{N_{k\max}} \quad \text{-----} \quad 2.1.6$$

Normalmente el coeficiente en los automóviles contemporáneos oscila entre los siguientes valores de 0.9 a 1.0 teniendo en cuenta la eficiencia del sistema de transmisión; la potencia máxima del motor será.

$$N_{\max} = \frac{G. - (f. \cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha)}{270 \cdot \mathcal{R} \cdot N_o} \cdot + \\ + \frac{0.0049 \text{ C.F.}}{270 \cdot \mathcal{R} \cdot N_o} \cdot V_{\max}^3 \quad \text{-----} \quad 2.1.7$$

Con esta ecuación podemos calcular los parámetros τ_n y N_p conociendo los mismos durante la etapa de proyecto podemos compararlos con los valores, que ofrece la siguiente figura. (2.5)

N

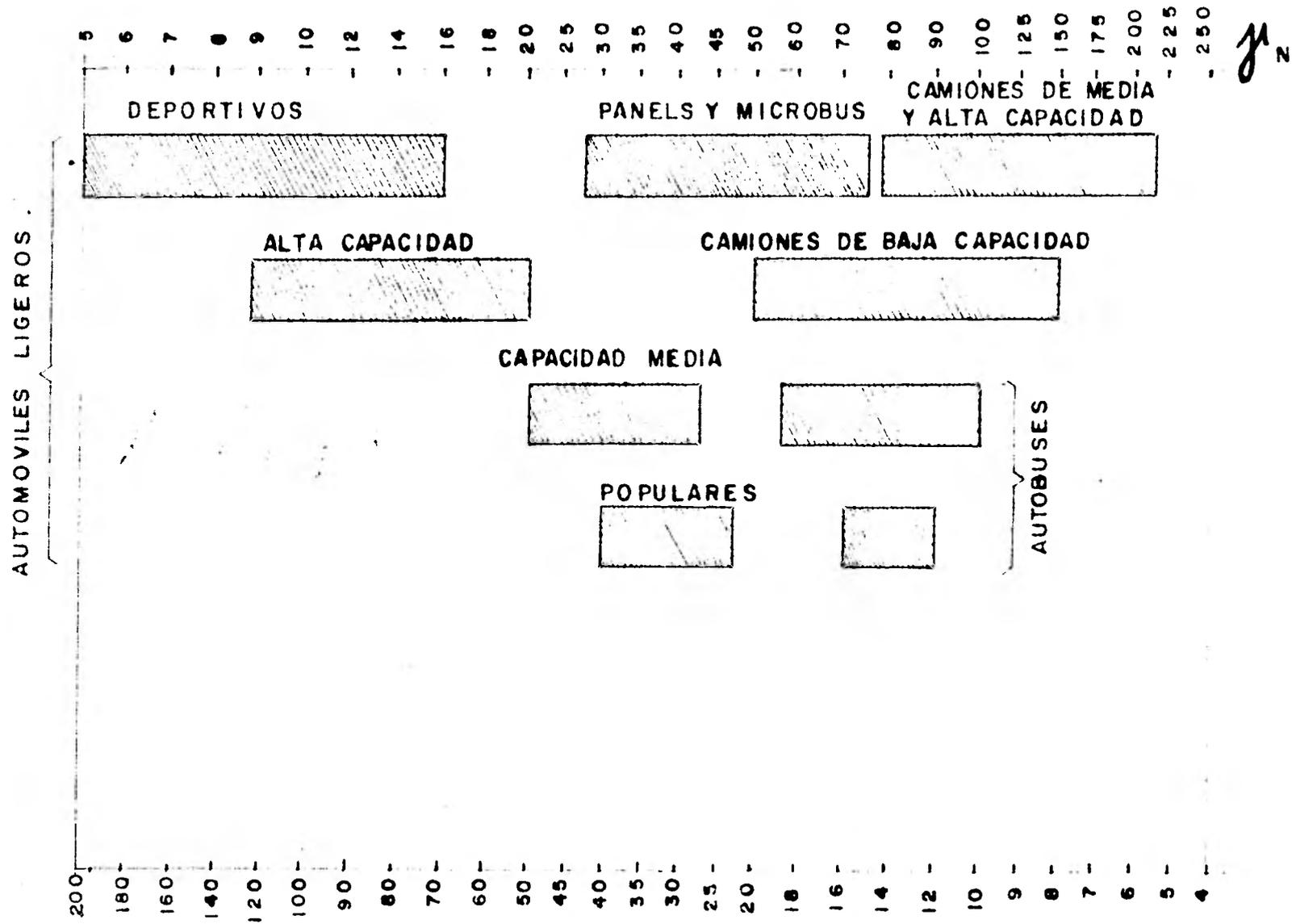


DIAGRAMA DE PESO ESPECIFICO Y POTENCIA ESPECIFICA PARA DIFERENTES TIPOS DE AUTOMOVILES
 FIG. 2.5.

Si en el automóvil aumentamos la potencia del motor entonces la habilidad para acelerar mejorará no obstante hay que considerar además que de la potencia del motor, en la habilidad de aceleración del automóvil, influyen --- otros factores como son:

- 1.- Peso del automóvil
- 2.- Valor del coeficiente f
- 3.- Dimensiones de la carrocería
- 4.- Eficiencia del sistema de transmisión
- 5.- Adherencia de las ruedas, etc.

Existen diferentes criterios para cuantificar la habilidad de aceleración del automóvil las cuales no analizaremos en este estudio, pues no es el fin; solo mencionaremos que una forma de hacerlo, es el de cuantificar el tiempo que demora el automóvil en ir desde una velocidad inicial $V_1 = 0$, hasta una velocidad final $V_2 = X$ Km/Hr.

En el siguiente capítulo analizaremos las características del motor de C.D. para su aplicación en la tracción del automóvil.

C A P I T U L O I I I

CARACTERISTICAS DE LOS MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

En los transportes automotores, una de las formas en como se puede llevar a cabo la tracción de vehículo, es mediante un motor eléctrico de corriente continua. Se ha adaptado el motor de corriente continua dado a que sus características son las más adecuadas, para los requerimientos que se presentan.

El principio de funcionamiento de este tipo de motores se basa en lo siguiente, si en un conductor por el cual circula una corriente y se encuentra en un campo magnético este experimenta una fuerza, que es perpendicular al plano donde se encuentran el campo magnético y a la corriente que circula por el conductor.

La ecuación por la que se representa el principio que se explicó es la siguiente:

$$F = B L \hat{i} \text{ ----- } 3.1.$$

donde:

F = fuerza resultante (New)

B = densidad del campo magnético (webw /m²)

L = longitud del conductor (m)

i = corriente que circula por el conductor (Amps)

En la siguiente figura ilustraremos lo antes mencionado

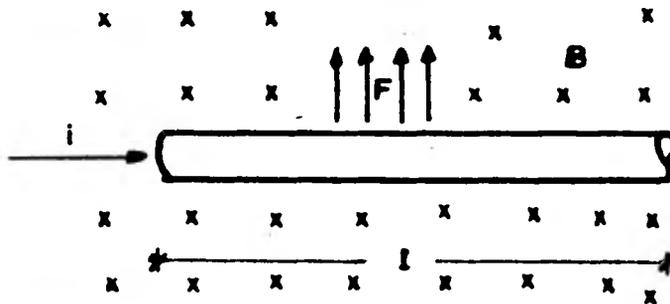


FIG. 3.1.

Este principio fué desarrollado por d'Arsonval y no solo se aprovecha en el motor de corriente continua, sino también se aprovecha en los aparatos de medición de parámetros eléctricos; como son el galvanómetro, el voltímetro, amperímetro, etc.

En la siguiente figura mostraremos en corte un motor de C.D.

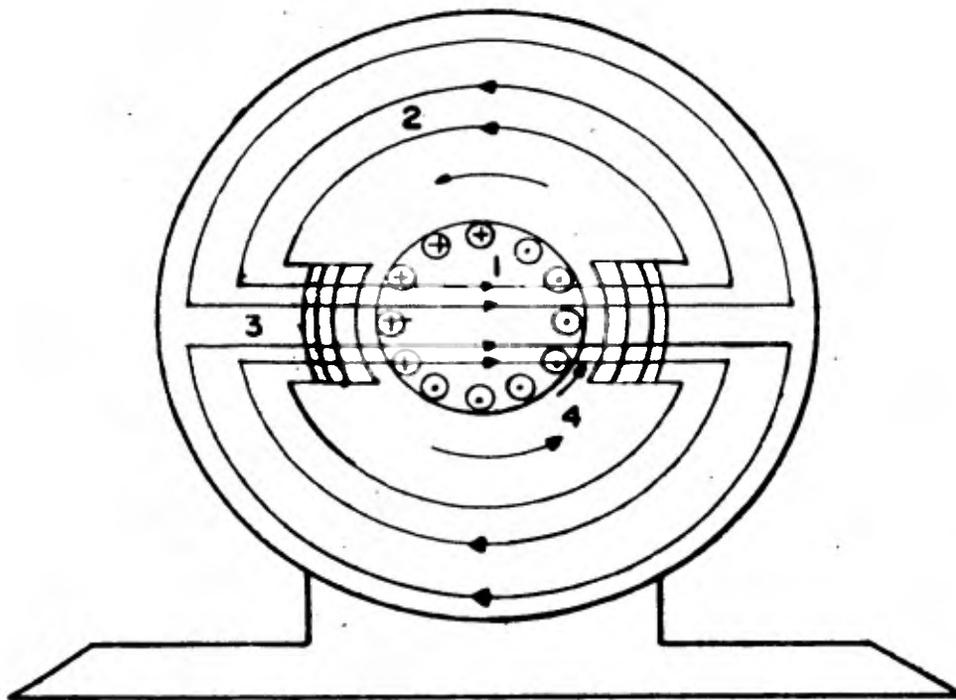


FIG. 3.2.

Mostrando sus partes principales, que a continuación enumeraremos:

- 1.- Núcleo de la armadura
- 2.- Coraza
- 3.- Núcleo de las piezas polares
- 4.- Entrehierro

Dentro del funcionamiento de la máquina de corriente continua es muy importante el comportamiento magnético que presenta el circuito de la máquina. Son muy importantes las pérdidas que se presentan en el entrehierro, en el núcleo y los devanados.

Si analizamos como se comporta el flujo magnético en el circuito de la máquina llegamos a la siguiente expresión:

$$\phi = \frac{FMM}{R_{fe} + R_a} \text{ ----- } 3.2.$$

donde: FMM = fuerza magnetomotriz

R_{fe} = reluctancia del circuito magnético.

R_a = reluctancia del aire

Sabemos que la fuerza magnetomotriz es igual al número de vueltas (N) de la bobina del circuito por la corriente de:

$$FMM = N I \text{ exc. ----- } 3.3$$

Por otra parte la reluctancia es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional a la sección transversal del circuito magnético

Otro parámetro importante que aparece en la reluctancia es la permeabilidad magnética del medio o del circuito.

Para nuestro caso intervienen dos partes básicas del circuito magnético, una parte del circuito magnético, una parte del circuito esta compuesta por la parte ferromagnética y la parte comprendida entre la armadura y la coraza, el entrehierro.

Por lo tanto tenemos dos permeabilidades la del hierro y la del vacio (practicamente igual a la del aire)

Las formulas que expresan la reluctancia del hierro y del aire son las siguientes:

$$\text{Reluctancia del hierro } R_{fe} = \frac{1}{\mu_{fe}} \frac{L}{A} \text{ ----- 3.4.}$$

$$\text{Reluctancia del aire } R_a = \frac{1}{\mu_0} \frac{X}{A} \text{ ----- 3.5}$$

μ_{fe} = permeabilidad del hierro

μ_0 = permeabilidad del vacio (practicamente --
igual a la del aire)

L = longitud media de las líneas de flujo dentro del elemento de hierro

X = longitud del entrehierro

A = área de la sección transversal del circuito magnético

Si sustituimos en la ecuación 3.2. las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5 llegamos a la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{A N I_{exc}}{\mu_0 L + \mu_{fe} X} \text{ ----- 3.6}$$

El comportamiento magnético del circuito de la máquina lo podemos apreciar en la siguiente figura, en la que cada elemento contribuye a una perdida de pendiente respecto a la curva de comportamiento de un nucleo de geometría regular y totalmente de hierro.

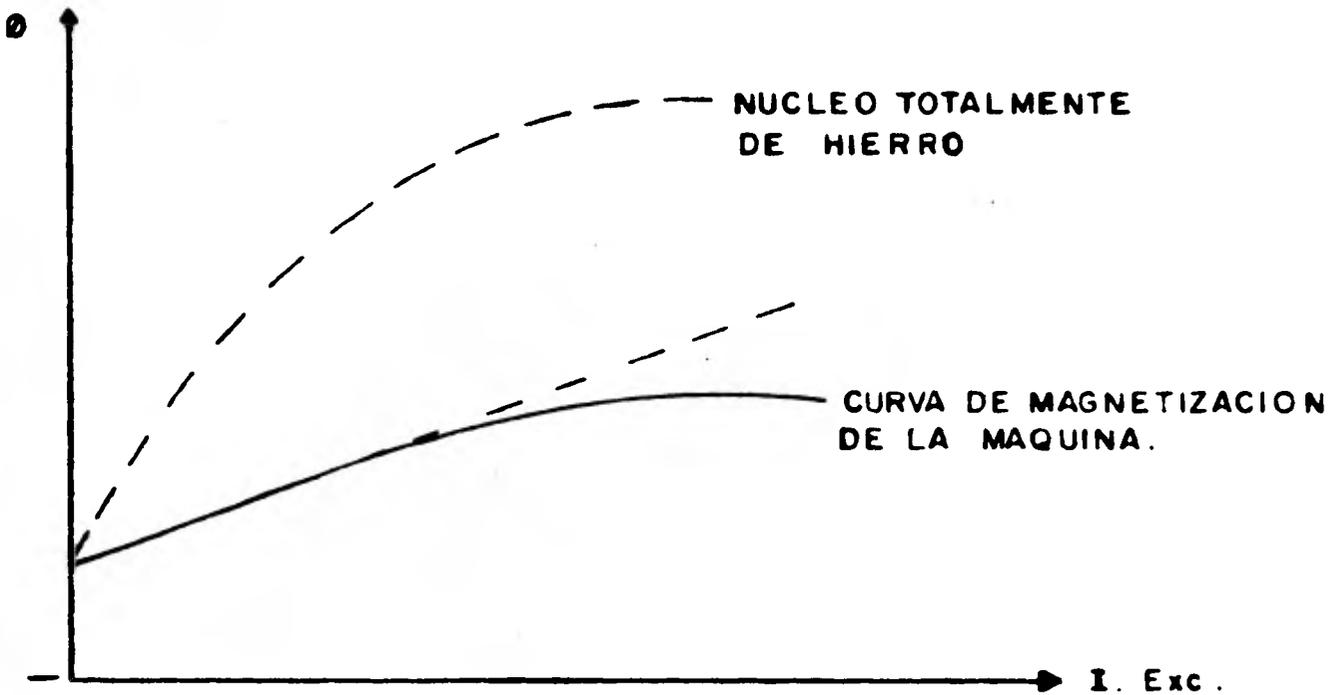


FIG. 3.3.

3.1. Función de Aproximación de Froelich.

Con el objeto de poder efectuar un estudio analítico de equilibrio de las máquinas de C.D. utilizando funciones, que reproduzcan el comportamiento real de las mismas de la manera más fiel es necesario conocer la ecuación de la curva de magnetización que hemos expuesto anteriormente.

Si intentáramos adoptar una función rigorista, sería demasiado complicada y nada práctica; Froelich, nos propone una ecuación relativamente sencilla, cuya aproximación a la curva real es aceptable, dicha ecuación es:

$$\phi = \frac{a I_{exc}}{b + I_{exc}} + P' \text{ ----- 3.1.}$$

en donde a y b son constantes y P' es el valor del flujo re-
manente. A manera de ejemplo de esta aproximación podemos -
observar la siguiente figura.

FUNCION DE FROELICH.

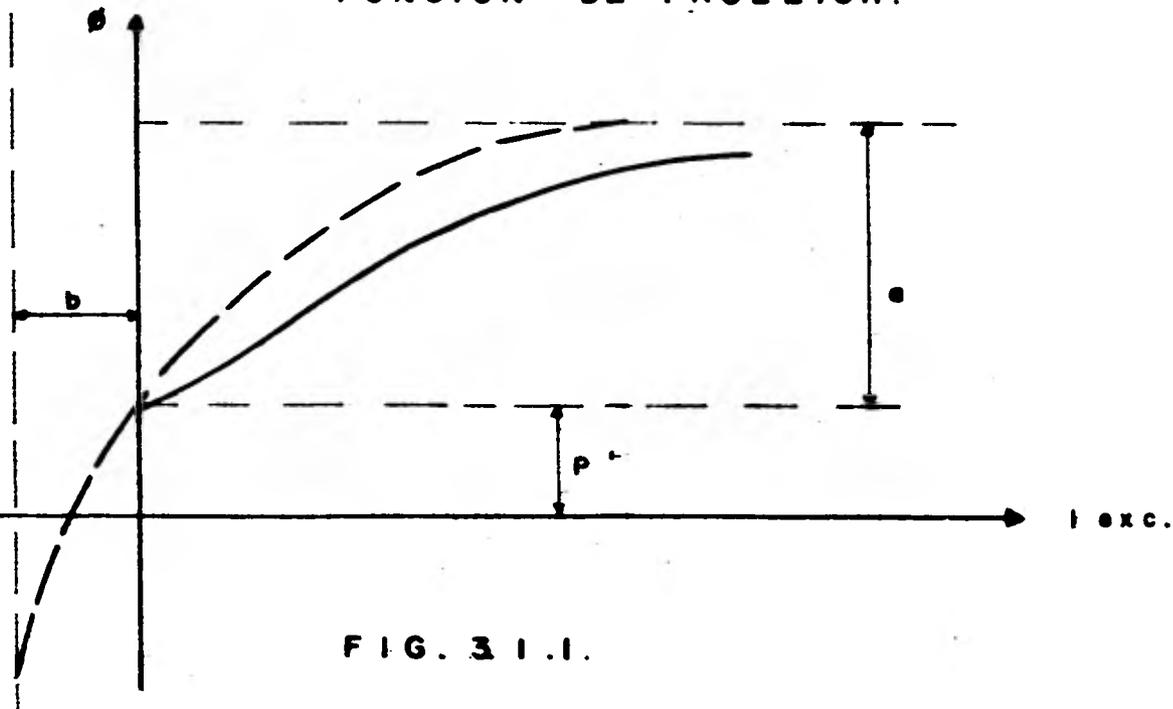


FIG. 31.1.

La región más importante de análisis de la máquina de corriente continua es la que se encuentra más cercana a su zona de saturación, que es como trabaja nominalmente.- Por lo tanto no tiene caso ver el comportamiento con corrientes de excitación pequeñas, o canalizarlo con el magnetismo remanente.

Esto nos permite simplificar la ecuación de Froelich de la siguiente manera:

$$\phi = \frac{a I_{exc}}{b + I_{exc}} \quad \text{----- 3.1.2}$$

La gráfica correspondiente a esta ecuación sería la siguiente:

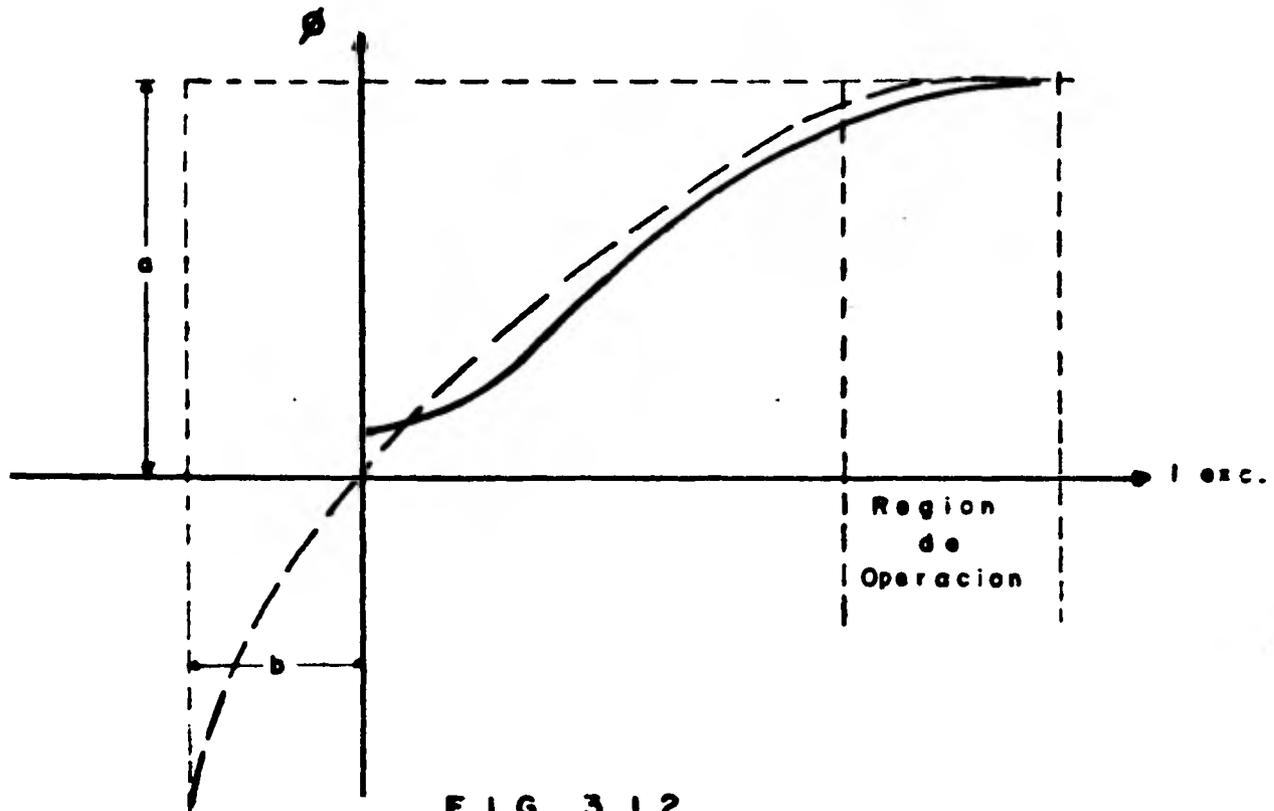


FIG. 3.1.2.

En la ecuación (3.1.2) podemos observar que fué eliminado el término de el magnetismo remanente P' ; por otra parte en la gráfica podemos ver, que esta curva pasa por el origen y tiene un magnetismo remanente nulo. La asíntota horizontal corresponde a la saturación total del núcleo, la cuál se presenta para una corriente de excitación muy grande (teóricamente infinita); en la otra asíntota vertical $I_{exc} = -b$.

Normalmente la máquina nunca opera en condiciones extremas de saturación, ni cerca del magnetismo remanente - por lo cuál la ecuación (3.1.2) es bastante aceptable para utilizarla en el análisis de equilibrio.

La fuerza electromotriz inducida en una máquina - está dado por las siguientes ecuaciones:

$$E = \frac{P \phi Z N}{60 A} \quad \text{sistema convencional} \quad \text{-----} \quad 3.1.3$$

$$E = \frac{P \phi Z W}{2\pi A} \quad \text{sistema M K S} \quad \text{-----} \quad 3.1.4$$

en donde:

E = fuerza electromotriz (volts)

P = número de polos de la máquina

ϕ = flujo por polo

Z = número total de conductores en las ranuras --
del núcleo de armadura

N = velocidad en R.P.M.

W = velocidad en radianes por segundo

A = número de circuitos en paralelo en el embobinado de armadura.

Para las ecuaciones 3.1.3 y 3.1.4 el flujo y la - velocidad son las variables independientes siendo la fuerza electromotriz (FEM) la variable dependiente, las demás variables dependen de la construcción de la máquina.

En la ecuación 3.1.3 las unidades que manejan son las R.P.M. para la velocidad y sistema MKS para el flujo, - son practicas pero no son convenientes en la aplicación del estudio de la máquina en equilibrio. En especial cuando se emplean las ecuaciones de Par es más congruente utilizar to das las unidades en el sistema MKS por lo que utilizaremos- la ecuación 3.1.4

Si de la ecuación 3.1.4 agrupamos todas las cons- tantes en una sola, nos queda lo siguiente:

$$K' = \frac{P Z}{2\pi A} \text{ ----- } 3.1.5$$

y la ecuación 3.1.4 se simplifica a:

$$E = K' W \phi \text{ ----- } 3.1.6$$

Esta ecuación 3.1.6 es la forma más sencilla de - expresar el voltaje inducido en la máquina. Pero tiene un - problema debido a que medir el flujo magnético es algo labo - rioso y complicado, por lo que utilizaremos la ecuación pro - puesta por Froelich, para que nos ayude en función de la co - rriente de excitación.

Si deseamos hacer un análisis rigorista y comple- to podemos utilizar la ecuación 3.1.1. y la expresión del - voltaje inducido sería la siguiente:

$$E = \frac{K' A W I_{exc}}{b + I_{exc}} + K' P' W \text{ ----- } 3.1.7$$

Si simplificamos un poco agrupando constantes bajo una misma denominación llegamos a la siguiente expresión:

$$\text{si } K'A = a \quad \text{y} \quad K'P' = P$$

entonces;

$$E = \frac{aw I \text{ exc}}{b + I \text{ exc}} + P w \text{ ----- } 3.1.8$$

El análisis de la máquina de C.D. nos interesa al rededor de sus características nominales de operación, y pa ra tal caso la ecuación 3.1.2 nos facilita el estudio.

Si sustituimos la ecuación 3.1.6 en la ecuación - 3.1.2 llegamos a lo siguiente:

$$E = \frac{K' A W I \text{ exc}}{b + I \text{ exc}} \text{ ----- } 3.1.9$$

Si agrupamos en una sola constante:

$$K' A = a \text{ llegamos a}$$

$$E = \frac{a}{b + I \text{ exc}} W I \text{ exc.} \text{ ----- } 3.1.10$$

Si observamos la ecuación 3.1.10 vemos que esta - expresión es del tipo:

$$E = K w I \text{ exc} \text{ ----- } 3.1.11$$

Que es similar a la ecuación 3.1.6, teniendo en - cuenta que K no es solo una constante sino que también de-- pende del valor de la corriente de excitación

$$K = \frac{a}{b + I_{exc}} \quad \text{-----} \quad 3.1.12$$

En la siguiente figura se muestra una gráfica de las ecuaciones 3.1.8 y 3.1.10

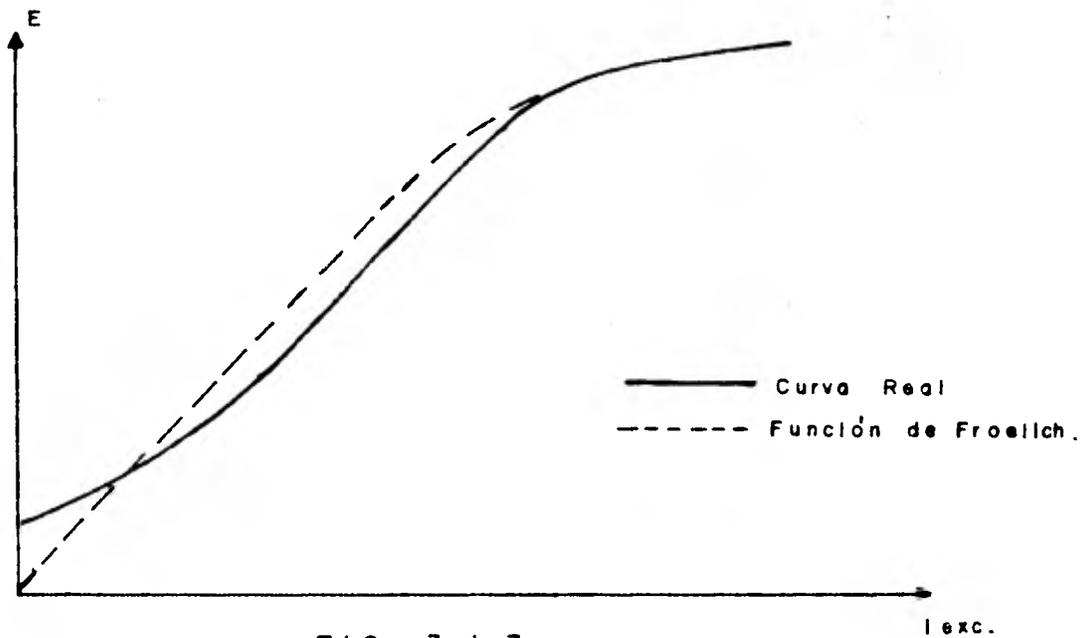


FIG. 3.1.3.

Si graficamos la ecuación 3.1.10 para diferentes valores de W , en tal forma que $W_3 > W_2 > W_1$, obtendremos la siguiente gráfica:

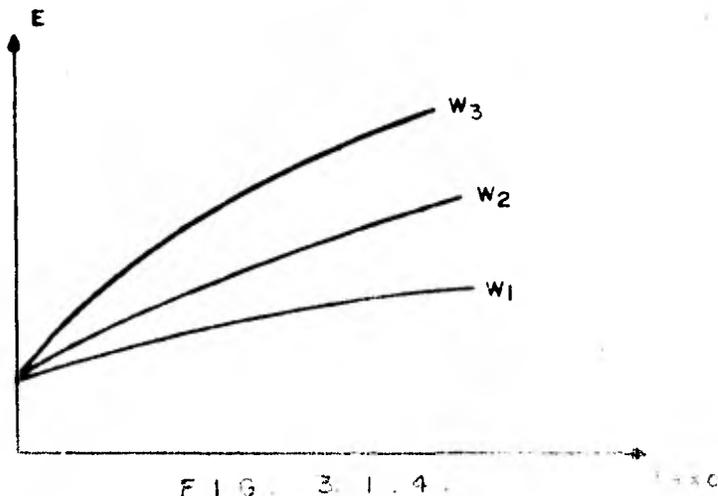


FIG. 3.1.4.

Las curvas mostradas en las figuras anteriores se conocen como Curvas de saturación en vacío.

3.2. Determinación de la Curva de Saturación en Vacío.

Para los diferentes análisis de máquinas de C.D. la curva de saturación en vacío juega un papel primordial, así que por lo tanto el primer paso sería determinarla.

Una forma de efectuarlo sería acoplando la máquina de C.D. a un motor adecuado de tal forma que hicieramos trabajar a la máquina de C.D. como generador con una velocidad uniforme y excitandola independientemente desde un valor mínimo hasta llegar a un valor de 150% del valor normal de operación.

En la siguiente figura se muestra un digrama eléctrico de las conexiones para efectuar dicha prueba.

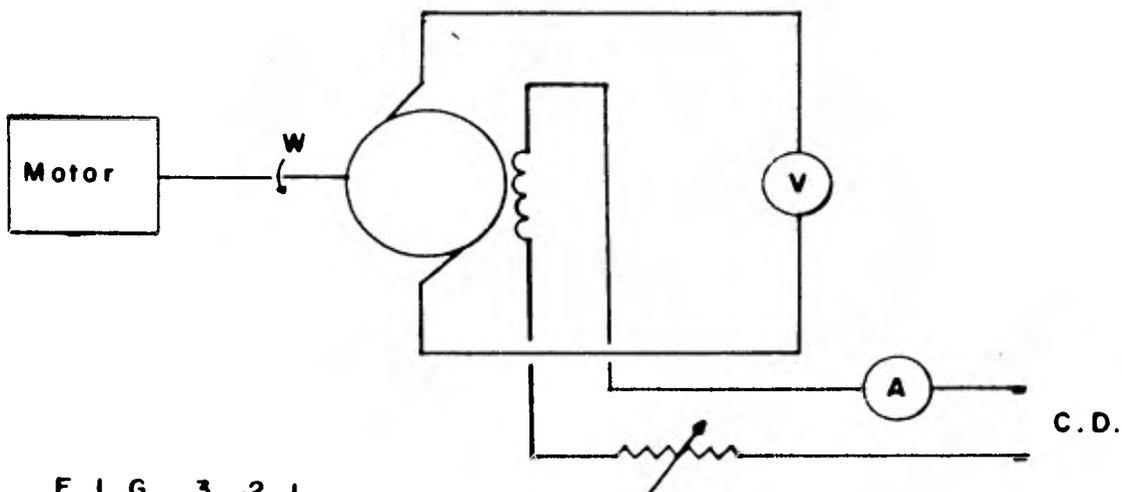


FIG. 3.2.1.

Luego procedemos a llenar la siguiente tabla, --- siempre en orden ascendente para evitar los errores de la histeresis.

I exc. Amp.	E Volts.	Vel. R. P.M.
0	E ₀	N
I _i	E _i	Cte.
I _j	E _j	Cte.
I _j	E _j	Cte.
"	"	"

Para obtener la expresión del voltaje inducido, - debemos aplicar las ecuaciones 3.1.8 y 3.1.10

$$E_i = \frac{(aw) I_i}{(b) + I_i} + (Pw) \quad 3.1.8a$$

$$E_j = \frac{(aw) I_j}{(b) + I_j} + (Pw) \quad E_o = (Pw)$$

$$E_i = \frac{(aw) I_i}{(b) + I_i} \quad \text{-----} \quad 3.1.10a$$

$$E_j = \frac{(aw) I_j}{(b) + I_j}$$

Si dividimos las ecuaciones entre la velocidad an gular (w , en rad/seg.) podemos obtener los parametros a , - b y P .

Tanto las ecuaciones 3.1.8 y 3.1.10 las podemos - trabajar como ecuaciones simultaneas y obtener los paráme-- tros antes mencionados.

Es posible que se obtengan funciones muy alejadas de la realidad, por lo que es conveniente, tomar varios pares de puntos de distintas regiones de la curva y promediar los parámetros obtenidos, hasta lograr una aproximación lo más cercana a la realidad.

3.3. Fuerza Eléctromotriz del Motor con Carga

Cuando la máquina está trabajando como motor, se induce en la armadura una FCEM, conocida como fuerza contra electromotriz.

Los elementos operativos de la máquina de C.D. -- funcionando como motor los muestra la siguiente figura:

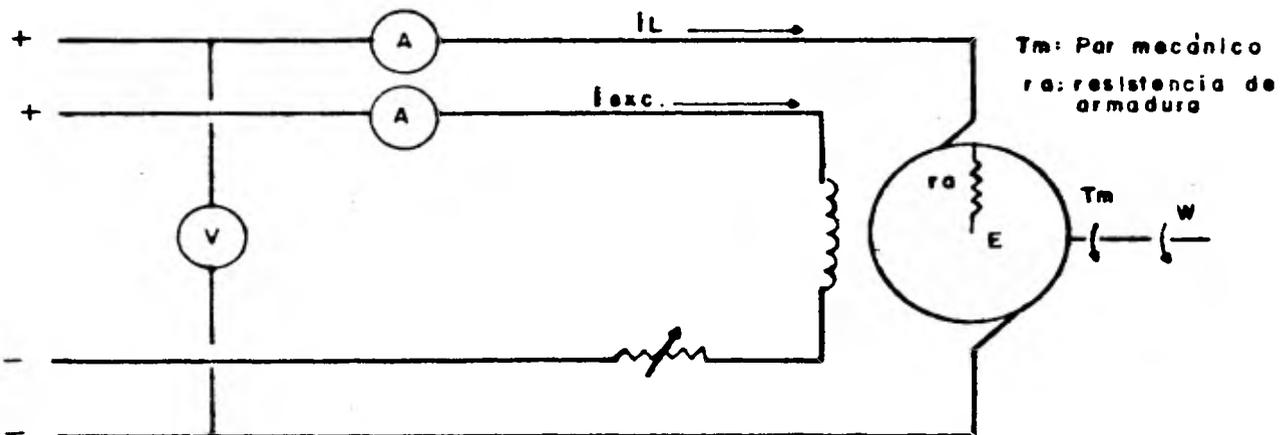


FIG : 3.3.1.

En el caso del motor la FCEM, es menor que el voltaje aplicado (V) del circuito de armadura de manera que:

$$V = E + r_a I_L \quad \text{-----} \quad 3.3.1$$

La única diferencia entre el motor y el generador es el signo del segundo miembro.

3.4. Par Electromagnético

Cuando existe simultáneamente el flujo inductor - debido a la corriente de excitación y un flujo en la armadura debido a la corriente de línea, la interacción entre estos dos campos produce un par mecánico de origen electromagnético.

En caso de que la máquina operara como generador - el sentido de giro sería opuesto al sentido del Par; si por el contrario opera como motor entonces la velocidad y el Par son del mismo sentido.

A continuación mostraremos en el siguiente diagrama el balanceo de potencia.

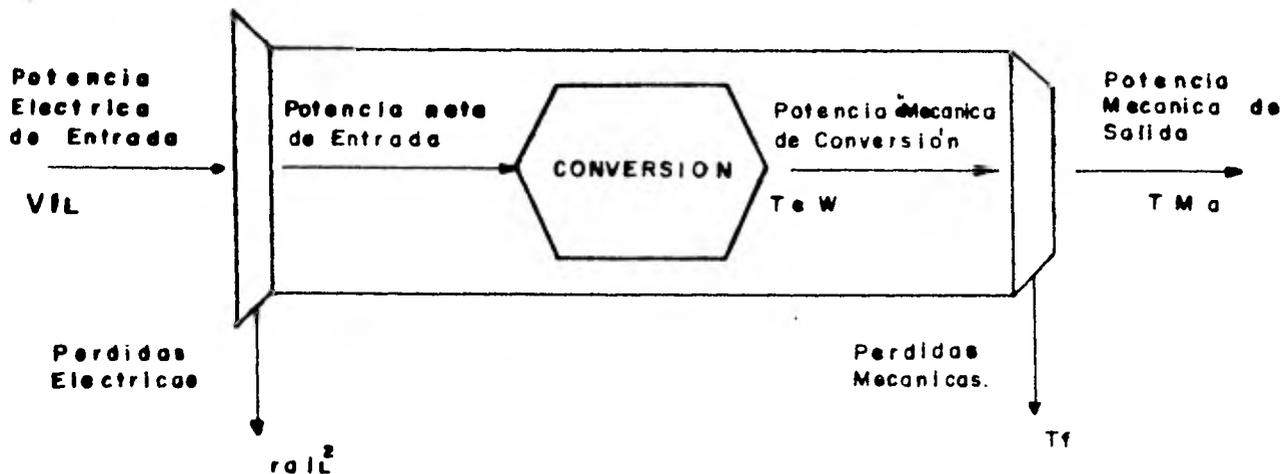


FIG. 3.4. 1.

En la máquina de C.D. la potencia consta de un -- Par mecánico (TM) y una velocidad angular (W).

En el Par de la máquina de C.D. interviene el Par de fricción, lo cual reduce el Par electromagnético de la armadura; por lo tanto el Par mecánico del motor de C.D. -- quedaría dado por la siguiente expresión:

$$T_M = T_e - T_f \text{ ----- } 3.4.1$$

donde:

T_M = Par mecánico

T_e = Par electromagnético

T_f = Par de fricción

Así como en la parte mecánica, tenemos pérdidas, -- también existen en la parte eléctrica, debido al circuito -- de armadura por lo tanto la potencia en la armadura ($E I_a$) -- es diferente a la que se entrega en las terminales ($V I_a$).

Cuando la máquina de C.D. trabaja como motor el -- fenomeno de conversión se da en que una potencia eléctrica -- la transformaremos en una potencia mecánica de donde pode-- mos establecer lo siguiente:

La potencia mecánica (PM) esta dada por:

$$P_M = T_e \cdot W \text{ ----- } 3.4.2$$

y la potencia eléctrica (P_e) viene dada por:

$$P_e = E I_L \text{ ----- } 3.4.3$$

donde: E = fuerza electromotriz producida en la armadura
ra

IL = corriente de línea

si igualamos las ecuaciones 3.4.2 y 3.4.3 obtenemos

$$T_e W = E I_L \text{ ----- } 3.4.4$$

si despejamos a T e llegamos a:

$$T_e = \frac{E I_L}{W} \text{ ----- } 3.4.5$$

El Par de fricción es importante analizarlo puesto que constituye una de las pérdidas principales que se --
presentan en la máquina de C.D.

La fricción está compuesta por tres partes que --
son: la resistencia al inicio del movimiento, fricción estática, la fricción seca, que si mantiene en un valor constante y la fricción dinámica, que varía con el movimiento de --
la máquina.

La fricción estática o coeficiente de fricción estática (fe) tiene un comportamiento, similar al de la función impulso y que representamos en la siguiente figura.

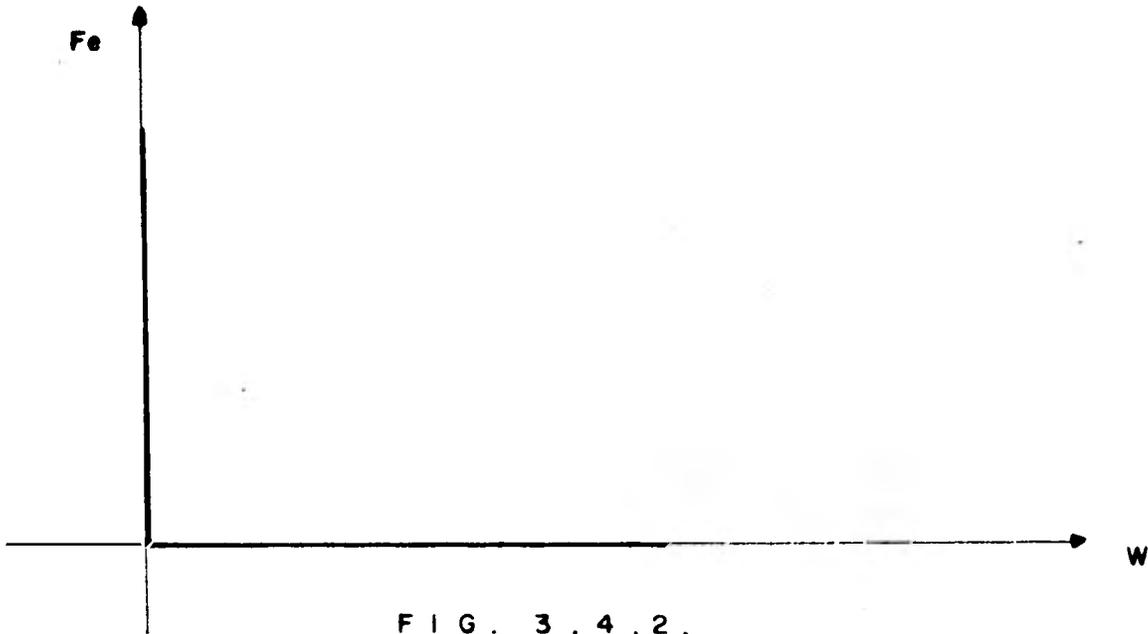


FIG. 3.4.2.

La fricción seca (f_s) su comportamiento es constante, sin importar, la velocidad de la máquina, a continuación mostramos su modelo, mediante la siguiente gráfica:

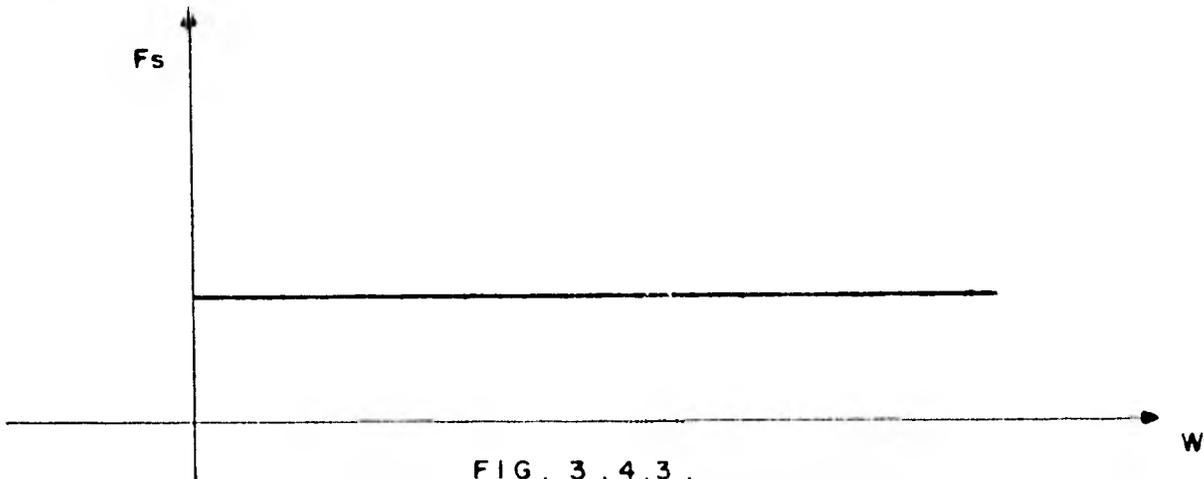


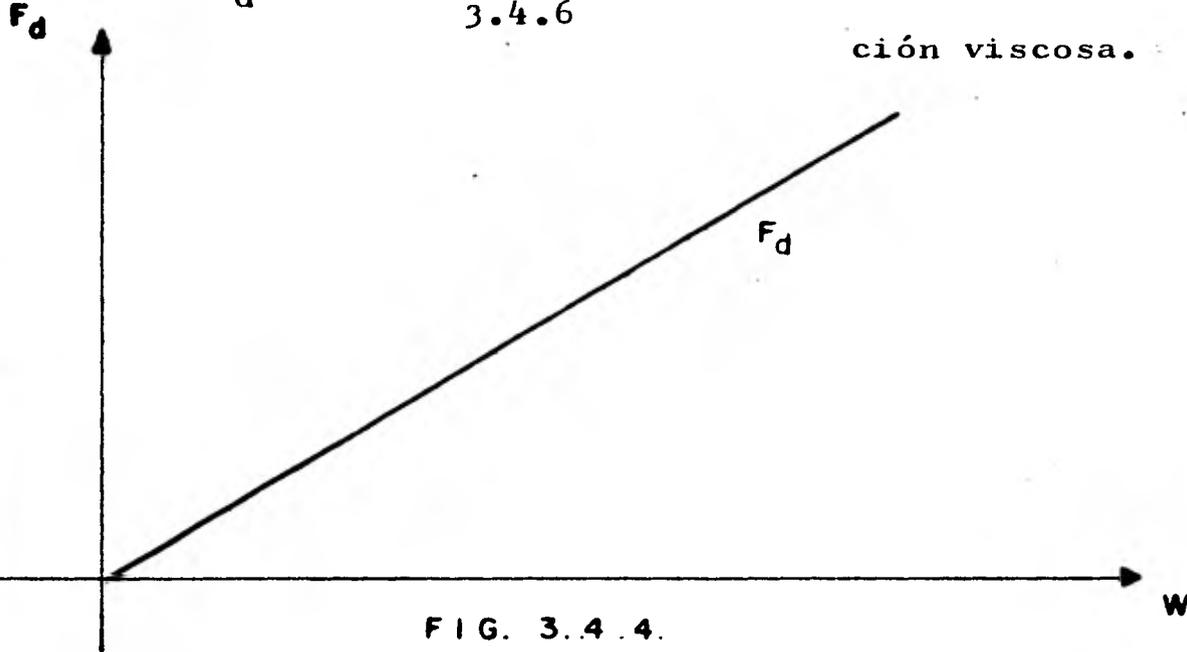
FIG. 3.4.3.

La fricción dinámica o coeficiente de fricción dinámica (f_d), es la más importante puesto que su comportamiento presenta una linealidad con respecto a la velocidad-

En este caso la pendiente de esta línea recta es el coeficiente de fricción viscosa (D), este coeficiente, tiene un valor específico para cada tipo de máquina, dependiendo de su construcción:

La ecuación que nos da el comportamiento de el coeficiente de fricción dinámica es la siguiente:

$$f_d = D W \quad 3.4.6 \quad \text{donde } D = \text{coeficiente de fricción viscosa.}$$



si consideramos, los 3 tipos de fricción o sea la fricción-total (ft) y trazamos una gráfica, obtendremos lo siguiente:

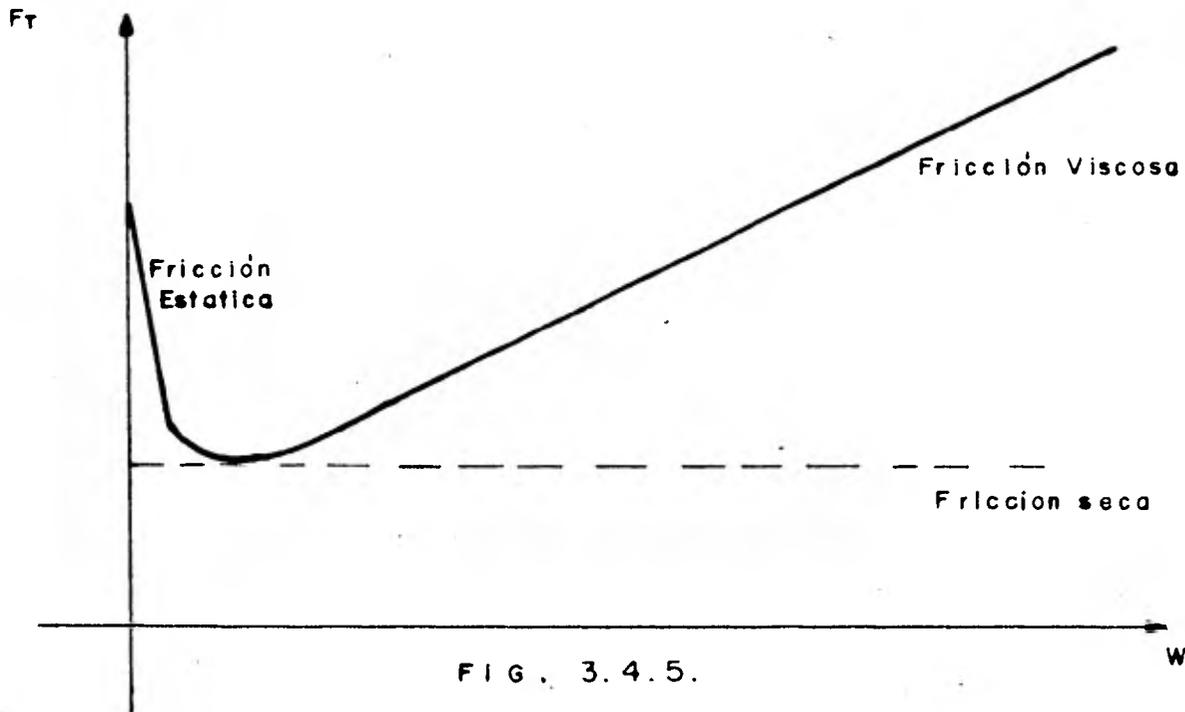


FIG. 3.4.5.

Prácticamente el coeficiente de fricción viscosa es el que determina las pérdidas mecánicas, por lo tanto es importante el poder cuantificarlo.

Una forma de cuantificarlo la podemos obtener a partir de la ecuación 3.4.1

$$T_M = T_e - T_f \quad \text{-----} \quad 3.4.1$$

Si consideramos al motor sin carga, entonces no estará entregando potencia mecánica y solo estará venciendo la fricción, por lo tanto en estas condiciones, la potencia mecánica (PM) será:

$$PM = 0$$

Entonces si a la ecuación 3.4.1. la multiplicamos por w tenemos la ecuación de las potencias.

$$T_M \cdot W = T_e \cdot W - T_f \cdot W. \text{ ----- } 3.4.7$$

si $T_M \cdot W = 0$ entonces:

$$0 = T_e \cdot W - T_f \cdot W \text{ ----- } 3.4.8$$

El Par de fricción (T_f) esta dado por la siguiente ecuación:

$$T_f = DW \quad \text{donde } D = \text{coeficiente de fricción viscosa}$$

si sustituimos esta expresión en la ecuación 3.4.8

$$0 = T_e \cdot W - D W^2$$

si despejamos el coeficiente D .

$$D = \frac{T_e}{W} \text{ ----- } 3.4.9$$

si sustituimos la ecuación 3.4.5 en la 3.4.9

$$D = \frac{E I_L}{W^2} \text{ ----- } 3.4.10$$

si queremos expresarlo de otra forma podemos despejar de la ecuación 3.3.1 a E y sustituir en la ecuación 3.4.10

$$D = \frac{(V. ra I_L) I_L}{W} \text{ ----- } 3.4.11$$

3.5. Respuesta de la Máquina de C.D. como Motor

Es importante saber como se comporta el motor de C.D. en sus diferentes tipos de excitación que se pueden -- adoptar como son:

- A) Excitación independiente
- B) Excitación en derivación
- C) Excitación en Serie

A) Motor con Excitación Independiente

Si observamos el circuito del motor con excitación independiente parecería, poco práctico puesto que necesita dos fuentes de alimentación, una para la armadura y otra para el campo.

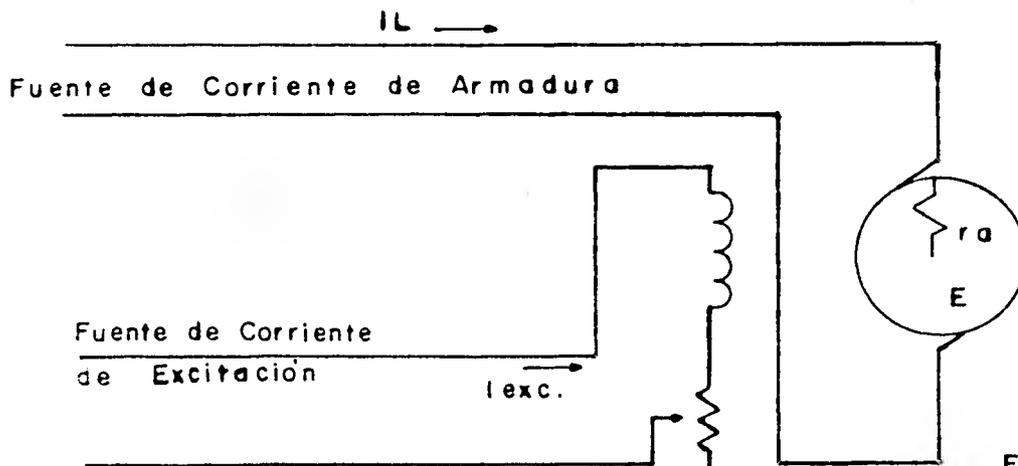


FIG. 3.5.1.

Si lo analizamos, por otra parte vemos que presenta grandes ventajas para el control de velocidad de la máquina.

Generalmente al operar la máquina se ajusta a sus condiciones nominales y la corriente de excitación adquiere un valor constante, lo cuál nos permite utilizar la función de Froelich simplificada.

$$E = \frac{a}{b + I_{exc}} \cdot w \cdot I_{exc} \text{ ----- } 3.1.10$$

si establecemos que:

$$K_e = \frac{a I_{exc}}{b + I_{exc}} \text{ ----- } 3.5.1$$

Ya se analizó que el comportamiento del circuito de armadura esta dado por la ecuación

$$V = E + r_a \cdot I_L \text{ ----- } 3.3.1$$

si sustituimos la 3.5.1 en la 3.1.10 llegamos a:

$$E = K_e \cdot w \text{ ----- } 3.5.2$$

Si esta ecuación 3.5.2 la sustituimos en la 3.3.1 nos queda como:

$$V = K_e \cdot w + r_a \cdot I_L \text{ ----- } 3.5.3$$

si despejamos a la velocidad angular

$$w = \frac{V - r_a \cdot I_L}{K_e} \text{ ----- } 3.5.4$$

Por otra parte analizando el equilibrio mecánico de la máquina funcionando como motor, podemos deducir la siguiente ecuación:

$$T_M = T_e - T_f \text{ ----- } 3.5.5$$

Si sustituimos las ecuaciones 3.4.5 y 3.5.2 en la 3.5.5 tenemos que:

$$T_M = K_e \cdot I_L - T_f \text{ ----- } 3.5.6$$

si despejamos la corriente de línea L

$$I_L = \frac{TM - Tf}{K_e} \quad \text{-----} \quad 3.5.7$$

nos lleva a la conclusión de que siempre va a existir un --
cierto valor de corriente de línea (I_L), aunque el motor --
estuviera en vacío, puesto que siempre va a existir un par--
de fricción por pequeño que sea.

Ahora si sustituimos la ecuación 3.5.7 en la ---
3.5.3 obtenemos:

$$W = \frac{K_e V - r_a TM - r_o T f}{K_e^2} \quad \text{-----} \quad 3.5.8$$

De esta ecuación podemos obtener varias cosas:

- a) velocidad del motor con voltaje de armadura --
constante y carga (PAR) variable.

Entonces la ecuación 3.5.8 la podemos analizar co
mo una recta, donde su pendiente es $-\frac{r_a}{K_e^2}$ y su ordenada al
origén es: $\frac{K_e V - r_a Tf}{K_e^2}$

- b) velocidad del motor con carga (Par) constante--
y voltaje de armadura variable.

En este caso la ecuación 3.5.8 también toma la --
forma de la ecuación de una recta, cuya pendiente es: $\frac{1}{K_e}$ y

su ordenada al origen es: $\frac{\tau_a (T_M - T_f)}{K_e^2}$

c) voltaje necesario para obtener velocidad constante con carga variable.

Si despejamos el voltaje (V) de la ecuación 3.5.8 obtenemos.

$$V = \frac{\tau_a \cdot T_M + K_e^2 W + \tau_a T_f}{K_e} \quad \text{-----} \quad 3.5.9$$

que también es una recta, cuya pendiente es $\frac{\tau_a}{K_e}$ y su ordenada al origen es: $\frac{(K_e^2 W + \tau_a T_f)}{K_e}$

Es conveniente para apreciar mejor lo que se trata de explicar poner su ecuación y su gráfica correspondiente.

a) Velocidad a voltaje constante

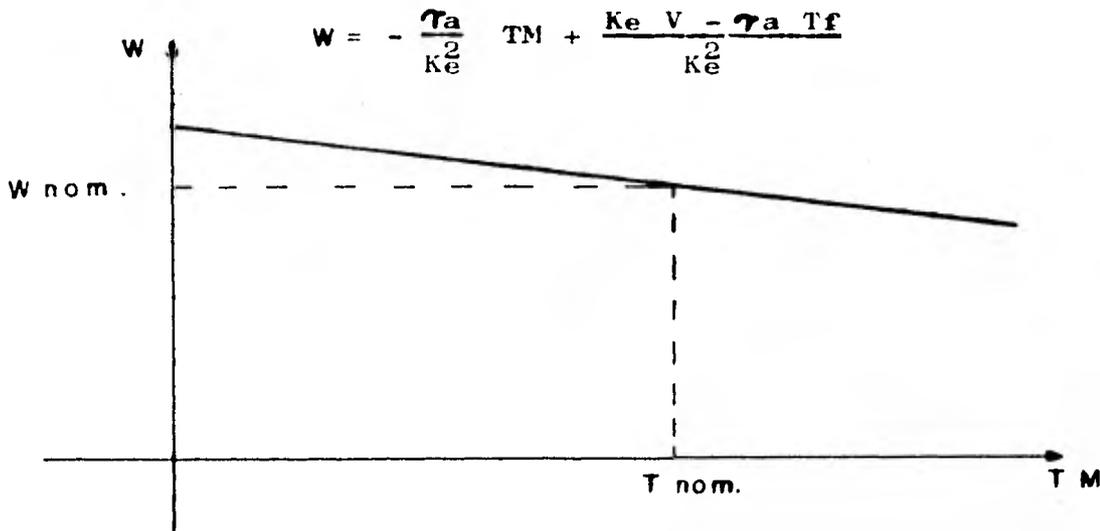


Figura 3.5.2

b) Velocidad con par constante

$$W = \frac{1}{K_e} v - \frac{r_a (T_M + T_f)}{K_e^2}$$

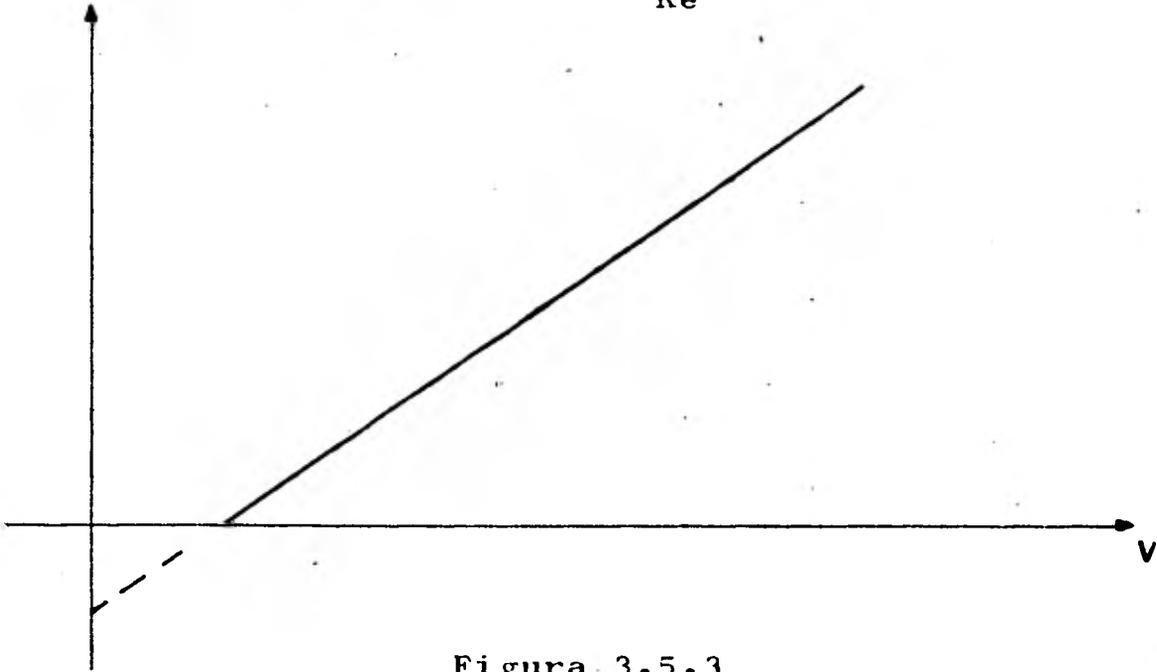


Figura 3.5.3

c) Voltaje necesario a velocidad constante

$$v = \frac{r_a}{K_e} T_M + \frac{K_e^2 W - r_a T_f}{K_e}$$

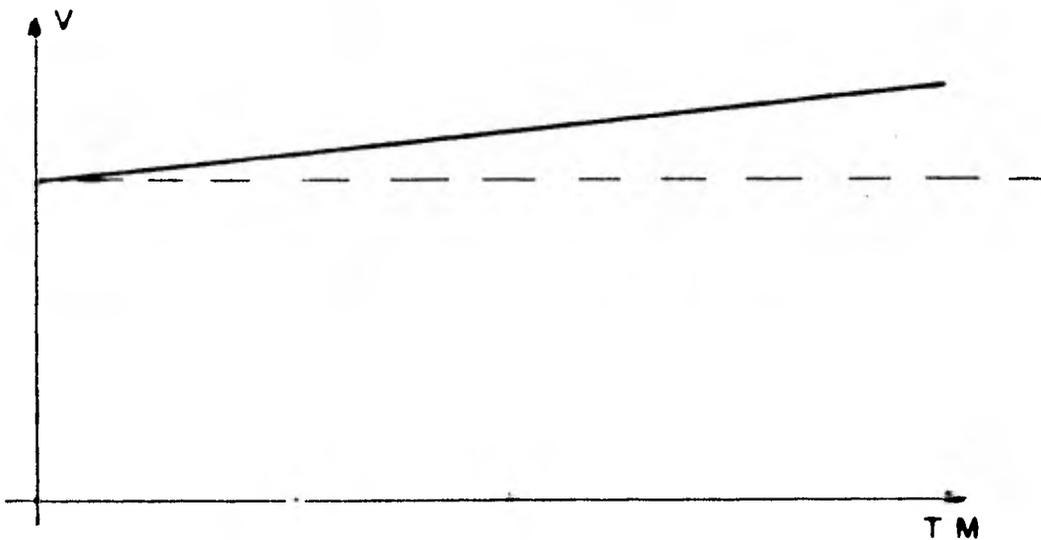


Figura 3.5.4

Al observar estas ecuaciones y graficas vemos que el primer caso (a) nos sirve para identificar la respuesta que obtenemos con este motor. Las otras dos ecuaciones y -- gráficas nos muestran las características que deben reunir las fuentes de alimentación.

d) Regulación de velocidad.

El concepto de regulación de velocidad, es muy importante puesto que nos define la perdida que tenemos en velocidad desde el vacio, hasta el funcionamiento a plena carga, y se expresa en porciento, de la siguiente manera.

$$\text{Reg. Velocidad} = \frac{W_r - W_{pc}}{W_{nom}} \times 100 \text{ -----3.5.10}$$

donde:

W_v = velocidad angular en vacio

W_{pc} = velocidad angular a plena carga

W_{nom} = velocidad angular nominal del motor

Si el motor se ajusta a una respuesta como el de la figura 3.5.2 entonces $W_{pc} = W_{nom}$.

B) Motor con Excitación en Derivación

El conectar el motor en excitación en derivación equivale a efectuar una conexión, en la cual con una misma fuente de alimentación se conecte el campo y la armadura, - en la siguiente figura se muestra el diagrama de conexiones.

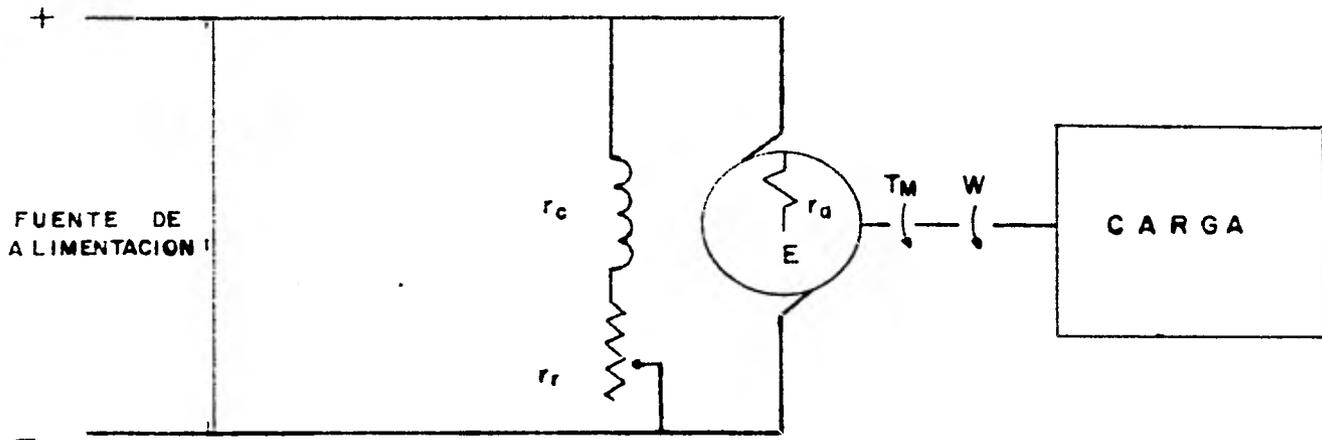


FIG. 3. 5. 5.

Normalmente hay un reostato extra, en serie con la armadura para limitar la corriente en la armadura en el arranque puesto que alcanza valores muy altos, y resulta -- muy peligroso.

No se incluyo este reostato en la figura puesto -- que analizaremos el motor en su estado estable.

Operando el motor bajo las condiciones de estado- estable lo podemos analizar comparativamente, como el motor de excitación independiente.

Por lo tanto podemos emplear la ecuación 3.1.10 -- para comenzar el análisis.

$$E = \frac{a}{b + I_{exc}} W \quad \text{-----} \quad 3.1.10$$

a) variación de la velocidad con excitación cons-

tante y carga variable.

En este caso el motor se comporta igual que el motor con excitación independiente con corriente de excitación y voltaje de armadura constante.

Así que por lo tanto la ecuación expresada en seguida nos es de utilidad.

$$W = - \frac{r_a}{K_e^2} T_M + \frac{K_e V - r_a T_f}{K_e^2} \quad \text{--- 3.5.8}$$

Esta ecuación, también es una recta del tipo $y = Mx + b$, donde $-\frac{r_a}{K_e^2}$ es la pendiente y $\frac{K_e \cdot V - r_a T_f}{K_e^2}$ es la ordenada al origen.

La gráfica de esta ecuación sería como sigue:

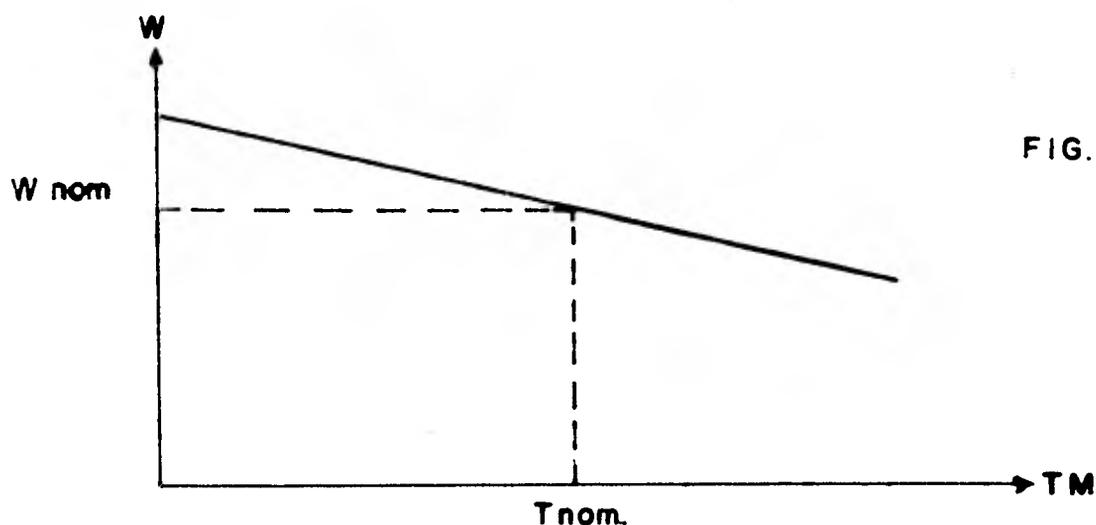


FIG. 3.5.6.

b) variación de velocidad con carga constante y corriente de excitación variable.

El reostato de campo nos permite una variación en la velocidad , en comparación con el control que se tiene con el motor con excitación independiente.

Para analizar en estas condiciones el motor partiremos de las ecuaciones:

$$E = \frac{a}{b + I_{exc}} W \quad \text{I}_{exc} \quad \text{-----} \quad 3.1.10$$

$$T_e = \frac{E I_L}{W} \quad \text{-----} \quad 3.4.5$$

si sustituimos la ecuación 3.1.10 en la 3.4.5 obtenemos:

$$T_e = \frac{a}{b + I_{exc}} I_{exc} I_L \quad \text{-----} \quad 3.5.11$$

si atendemos a la ecuación de equilibrio mecánico llegamos a:

$$T_M = \frac{a}{b + I_{exc}} I_{exc} I_L - T_f \quad \text{-----} \quad 3.5.12$$

Hemos establecido que el Par mecánico (T_m) permanezca constante, lo cual nos permite que, al variar la corriente de excitación I_{exc} , varía la velocidad y la corriente de línea (I_L).

si de la ecuación 3.5.12 despejamos la corriente de línea I_L

$$I_L = \frac{(T_M + T_f)(b + I_{exc})}{a I_{exc}} \quad \text{-----} \quad 3.5.13$$

La ecuación que nos da el comportamiento de la armadura con carga es:

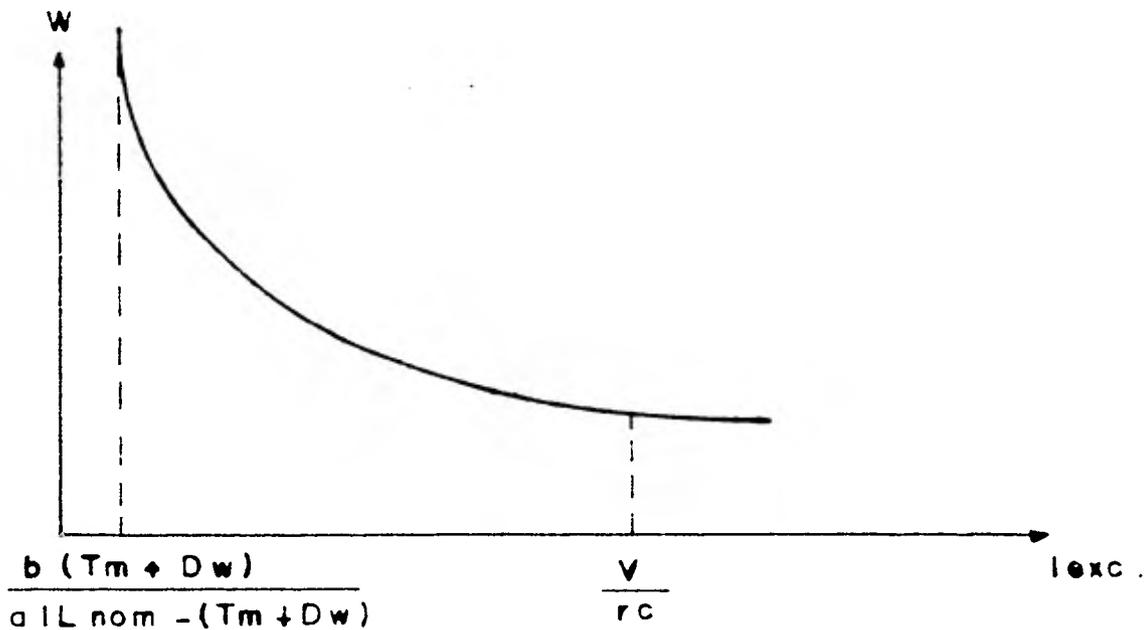
$$V = E + r_a I_L \quad \text{-----} \quad 3.3.1$$

Si sustituimos las ecuaciones 3.1.10 y 3.5.12 en la 3.3.1 llegamos

$$W = \frac{(a V - r_a T_M - r_a T_f) I_{exc}^2 + (abV - 2b r_a T_M - 2b r_a T_f)}{a^2 I_{exc}^2}$$

$$I_{exc} = \frac{b^2 r_a (T_M + T_f)}{a^2 I_{exc}^2} \quad \text{---} \quad 3.5.14$$

La gráfica de la ecuación 3.5.14 es la siguiente:



Como podemos observar el rango de velocidad es -- muy pequeño y sus limitaciones son las siguientes:

Limite Superior:

Para aumentar la velocidad es necesario disminuir

la corriente de excitación, por lo tanto aumenta la corriente de línea (I_L), tratando que no rebase su valor nominal, esto lo podemos ver de la ecuación:

$$T_M = \frac{a}{b + I_{exc}} I_{exc} I_L - T_F \text{ ----- } 3.5.12$$

si despejamos la corriente de excitación I_{exc} (mínima)

$$I_{exc} = \frac{b (T_M + T_F)}{a I_L \text{ nom} - (T_M + T_F)} \text{ ----- } 3.5.15$$

También hay que tener cuidado en no bajar demasiado la corriente de excitación (I_{exc}), por que se podría reforzar la velocidad nominal, peligrosamente y se destruiría la armadura.

Límite Inferior:

Si disminuimos la velocidad, es necesario incrementar la corriente de excitación, lo máximo que se podría lograr sería, eliminando el reostato de campo y se llegaría a un valor de resistencia que sería la de los propios devanador de campo.

$$I_{exc} = \frac{V}{r_c} \text{ ----- } 3.5.16$$

y en este caso sería la máxima corriente de excitación que se podría obtener.

Hay una cosa importante que debemos tener en cuenta, es que si el campo llegara a debilitarse demasiado o --

llegara a desaparecer, la velocidad de la máquina se dispararía peligrosamente y en su caso extremo, como ya se menciono se destruiria la armadura.

Regulación de Velocidad: El concepto, es el mismo que para el motor con excitación independiente así que:

$$\text{Reg. Velocidad} = \frac{W_v - W_{pc}}{W_{nom}} \times 100 \text{ ----- } 3.5.10$$

c) Motor con Excitación en Serie

La conexión del motor de C.D. con excitación serie consta del campo y la armadura conectados en serie como se muestra en la siguiente figura.

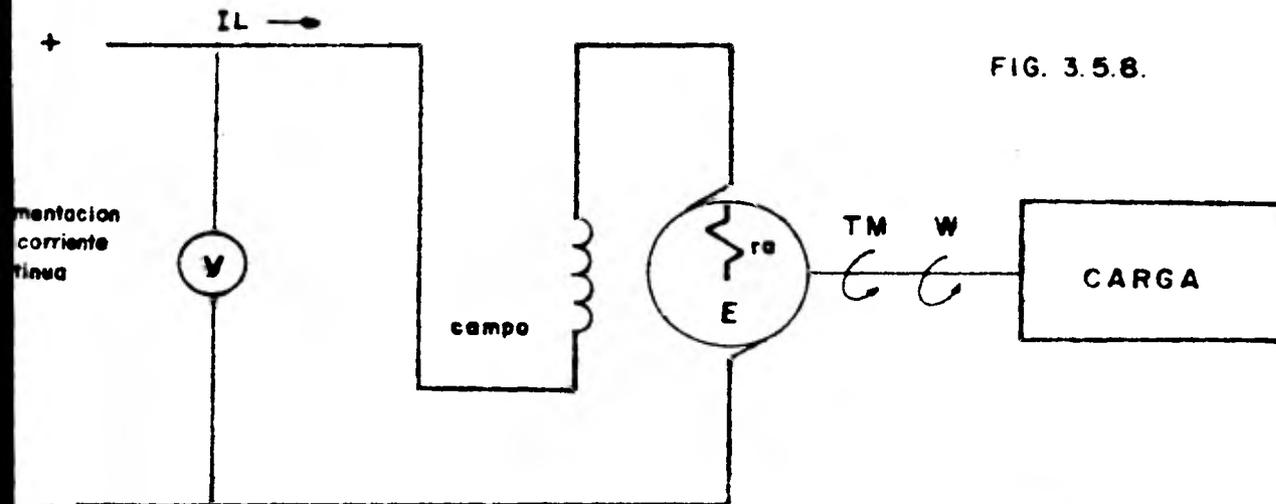


FIG. 3.5.8.

El comportamiento del circuito eléctrico de la armadura y el equilibrio mecánico de la máquina es igual a --

los anteriores casos.

$$V = E + r_a I_L \quad \text{-----} \quad 3.3.1$$

$$TM = T_e - T_f \quad \text{-----} \quad 3.4.1$$

a) velocidad de la máquina con voltaje constante y carga variable:

En este caso la ecuación de equilibrio mecánico es la siguiente:

$$TM = \frac{a I_L^2}{b + I_L} + P I_L - T_f \quad \text{-----} \quad 3.5.17$$

Si observamos esta ecuación vemos que el Par mecánico de la máquina esta en función de la corriente de línea (I_L) básicamente, por lo tanto buscaremos por facilidad -- una ecuación de velocidad (w) en función de la corriente de línea (I_L).

Si sustituimos la ecuación 3.1.8 en la 3.3.1 obtenemos:

$$w = \frac{Vb + (V - r_a b) I_L - r_a I_L^2}{pb + (a + P) I_L} \quad \text{-----} \quad 3.5.18$$

La gráfica de la ecuación 3.5.18 sería la siguiente:

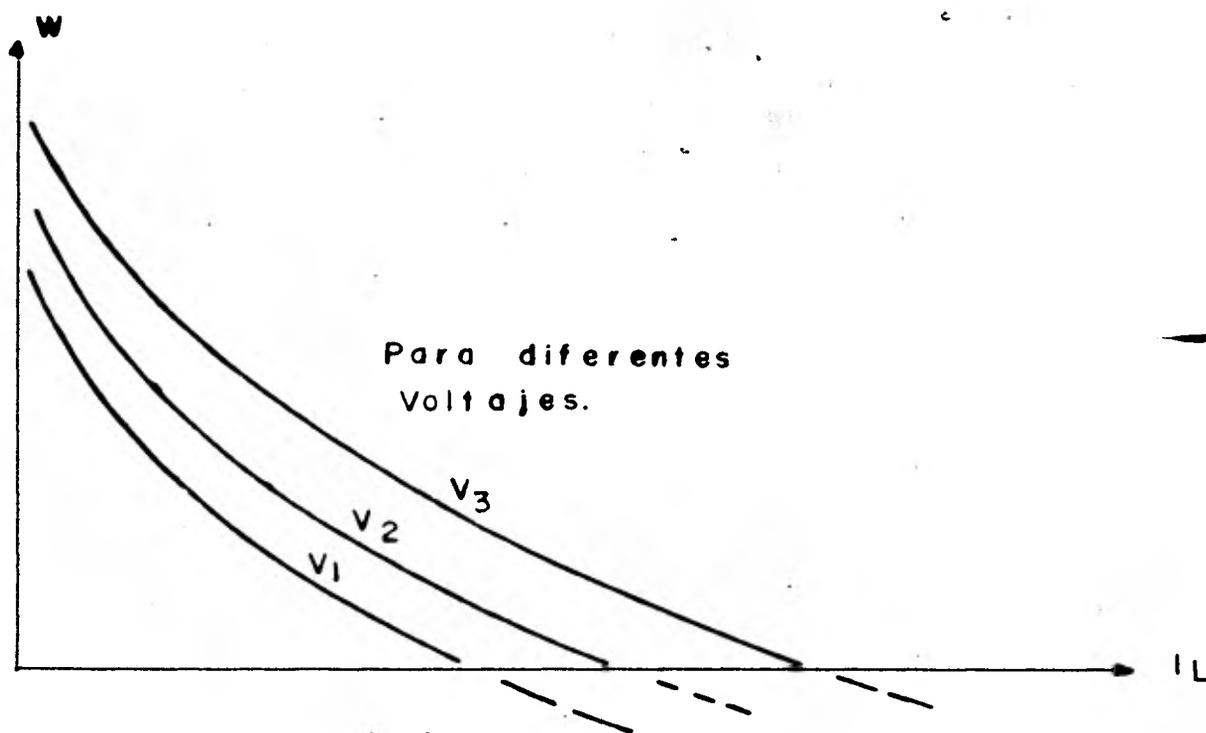


FIG. 3. 5. 9.

Si analizamos la ecuación de Par mecánico, se ve que al aumentar la corriente de línea (I_L) aumenta rápidamente el Par. Ahora si observamos la figura , vemos que si disminuye la velocidad aumenta la corriente de línea (I_L).

Esto nos lleva a la conclusión, de que sí vemos el comportamiento de la velocidad en sentido creciente, -- cuando la máquina arranca, tiene un valor de Par muy elevado y este tiende a normalizarse al acercarse a su velocidad nominal.

Este motor dentro de todos los que existen es el que tiene el Par más elevado al arranque, lo que lo hace el motor típico para sistemas de tracción.

b) Variación de la Corriente de Línea con Voltaje Constante y Par Mecánico Variable

Si volvemos a tomar la ecuación de equilibrio mecánico que vino de sustituir la ecuación 3.1.8 en la ecuación 3.4.1

$$TM = \frac{a I_L^2}{b + I_L} + P I_L - T_f \text{ ----- } 3.5.17$$

Si graficamos esta ecuación, teniendo en cuenta que para poderla tabular hay que tener en cuenta dos variables la corriente de línea (I_L) y la velocidad (W), y que por lo tanto se tabulará para los mismos valores de la ecuación 3.5.17 obtendremos la siguiente figura:

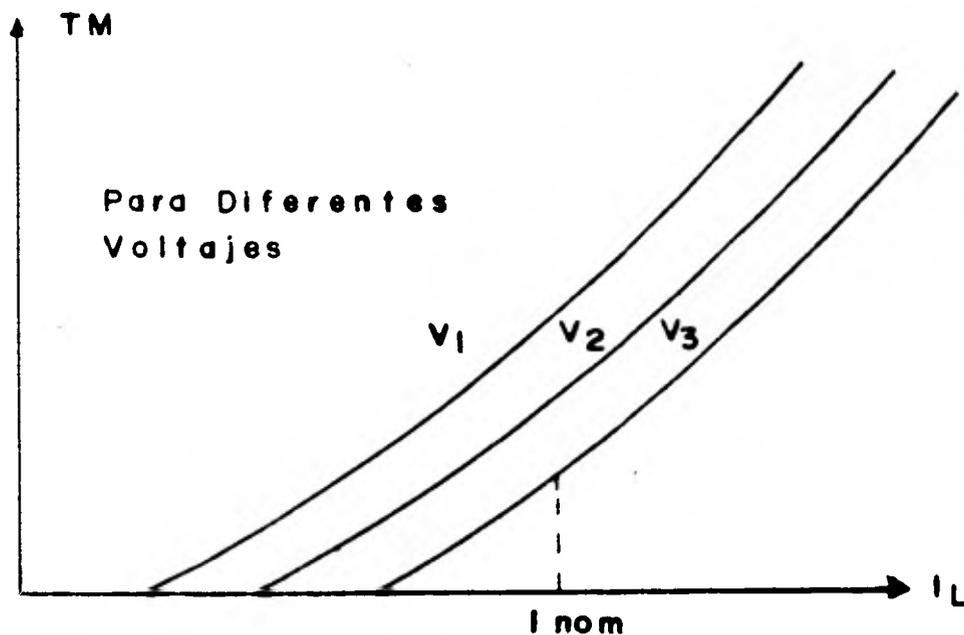


FIG. 3.5.10.

Al observar esta grafica, deducimos lo peligroso que es que se quede sin carga, pues esto dispara la veloci-

dad de esta, la fricción hace que la corriente de línea -- (I_L), no se anule, limitando la velocidad, pero este límite esta muy por encima de la velocidad nominal, si se llegara a presentar una condición así la armadura estallaría por fuerzas centrifugas.

c) Voltaje Necesario para Variar la Velocidad con Par Constante

De las dos gráficas anteriores vemos que la máquina es capaz de suministrar un Par de valor muy elevado esta hace, que también se eleve la corriente de línea, hasta --- diez veces su corriente nominal, por lo que es necesario para lograr un buen control, poder controlar el voltaje de -- alimentación.

Para lograr esta condición se hace necesario mantener constante la corriente de línea (I_L).

Si de la ecuación 3.5.18 reagrupamos terminos, de jando a el voltaje V variable obtenemos lo siguiente:

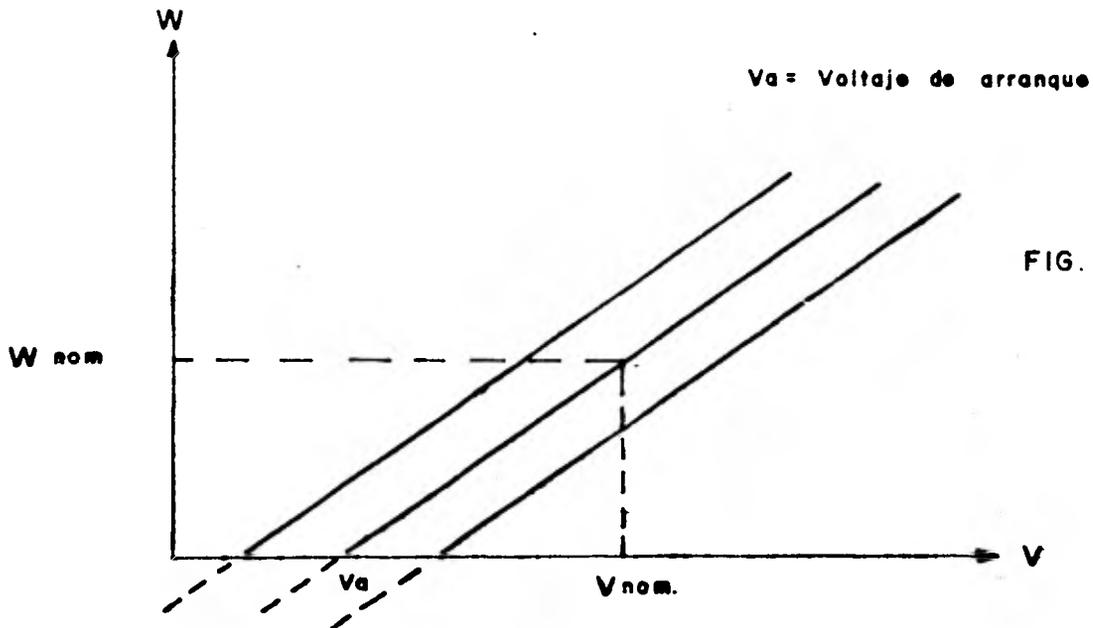
$$W = \frac{(b+I_L) V - (raI_L^2 + rabI_L)}{a I_L + (b+I_L) P} \quad \text{-----} \quad 3.5.18$$

que es la ecuación de una recta, cuya pendiente es:

$$\frac{(B+I_L) V}{a I_L + (b+I_L) P} \quad \text{y su ordenada al origen; } -\frac{raI_L^2 + rabI_L}{a I_L + (b+I_L) P}$$

La gráfica de esta ecuación 3.5.18 se muestra a

continuación:



Este motor tiene su principal aplicación en los sistemas de tracción para vehículos, para arrancar con su máximo Par sin exceder las corrientes permisibles, aplicamos un voltaje V_a inicial, al arranque.

Hay que tener en cuenta que este voltaje de arranque no puede ser muy pequeño, porque se traduciría en un Par débil y en consecuencia una aceleración débil.

En el otro extremo este voltaje no debe ser muy elevado pues las sobrecorrientes existentes en los arranques calentaría rápidamente la máquina, ya que estos en los vehículos son frecuentes.

3.6 Transición en la Operación de la Máquina de C.D.

En general las máquinas eléctricas son reversibles, como el transformador que lo podemos utilizar, como elevador o como reductor. Una máquina rotatoria puede ser utilizada como generador o motor.

En nuestro caso si la máquina de C.D. opera como generador cumple con la siguiente condición:

- 1.- Se comporta como fuente de energía y por lo tanto la corriente sale por el polo positivo
- 2.- Al circular la corriente por la armadura genera un Par de reacción contrario, al sentido de giro de la armadura

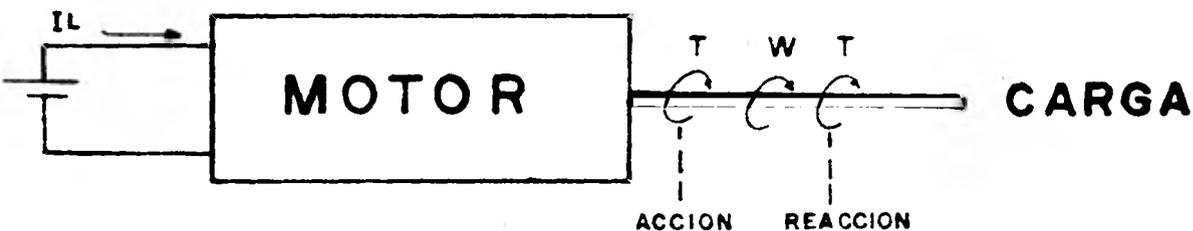


FIG. 3.6.10.

Cuándo la máquina de C.D. opera como motor cumple con las siguientes condiciones

- 1.- La máquina representa ~~una carga para el siste~~ma eléctrico, y la corriente entra por el polo positivo de la máquina
- 2.- El Par que se genera en la armadura es un Par de acción o sea, que es en el mismo sentido - de giro de la armadura

FIG. 3.6.II



Analizando el comportamiento de la máquina de -- C.D. como motor y generador vemos que algunas variables conservan, su mismo sentido de acción como la polaridad y sentido de rotación y otras lo cambian como la corriente y el Par electromagnético.

Conviene considerar un parámetro que es muy impor^{ante} de la máquina cuando opera como motor o generador que es la velocidad angular. Cuando esta operando como motor la carga se opone al sentido de rotación de la flecha y por lo tanto, la velocidad de vacío ω_v , es mayor que la velocidad de la máquina con carga.

Ahora explicaremos como se da la transición en la máquina de C.D.

Por ejemplo en un vehículo impulsado por un motor eléctrico que se encuentra subiendo por una cuesta, cuando el vehículo esta subiendo el motor esta demandando energía de la fuente al llegar a la parte más alta y comienza a bajar, entonces se invierte el motor y se convierte en un generador puesto que empieza a regresar energía a la fuente de alimentación.

Este es o puede ser uno de los muchos ejemplos en que una máquina sufre una transición de motor a generador, - si continuamos el análisis, veremos que luego hay una transición de generador a motor.

En general y por regla las máquinas eléctricas rotatorias no necesitan ningun cambio en su estructura, para efectuar la transición.

Como toda regla tiene una excepción, en el caso del motor de C.D. cuando pasa de la acción motriz a la generatriz, hay que cambiar las conexiones.

Para comprender mejor la transición analizaremos cada uno de los diferentes casos del motor de C.D.

3.7 Motor con Excitación Independiente

Para analizar mejor la transición nos auxiliaremos de un esquema de una máquina muy sencilla, con una sola bobina de excitación y una sola espira en la armadura.

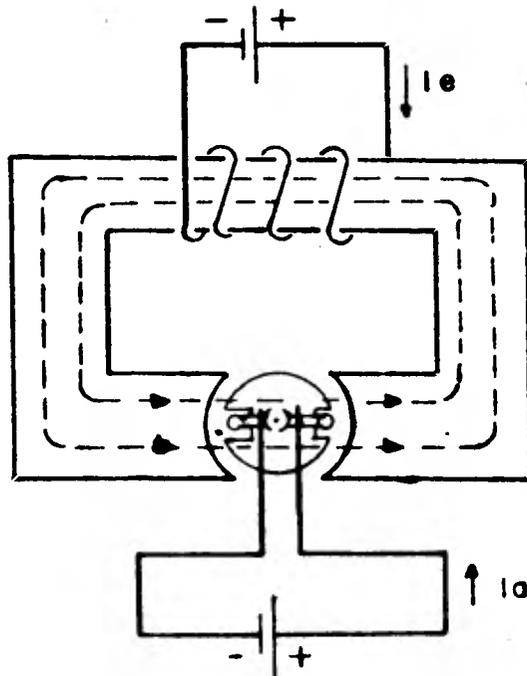


FIG. 3.7.1.

En la figura 3.7.1 tenemos una fuente de excitación con una corriente I_e , y una fuente de armadura con una corriente de armadura I_a .

Sabemos que si tenemos una corriente en presencia de un campo inductor, se genera un Par, que su sentido lo podemos obtener mediante las reglas de Fleming. Este Par produce el giro de la armadura originando una velocidad ω , y por lo tanto a la inducción de una fuerza contraelectromotriz.

Cuando la máquina está funcionando, el circuito -
equivalente es el siguiente y en donde E es igual a:

$E = K_w I_e$ ---- 3.5.15 donde K esta en función de la corrien
te de excitación.

$$K = \frac{a}{b + I_e} \text{ ---- 3.5.16}$$

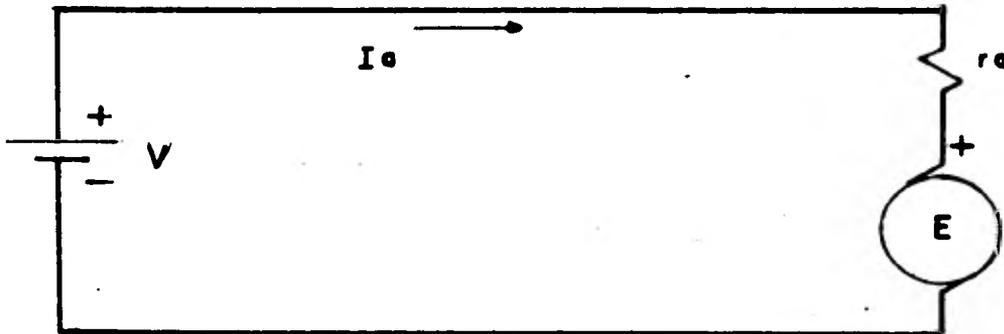


FIG. 372

Si establecemos las ecuaciones de comportamiento-
del circuito de la Figura 3.7.2 serían:

$$I_a = \frac{V_a - E}{r_a} \text{ ----- 3.5.17}$$

y el Par estaría dado por la expresión:

$$T_e = \frac{E I_a}{\omega} \text{ ----- 3.5.18}$$

sustituyendo la ecuación 3.5.15 en la 3.5.18 llegamos a:

$$T_e = K I_e I_a \text{ ----- 3.5.19}$$

Si la máquina acelera hasta alcanzar la velocidad
 ω_v , entonces la corriente I_a y el Par T_e son iguales a cero
y de acuerdo con esto:

$$E = V = K \cdot \omega_v \cdot I_e \text{ ----- 3.5.20}$$

A continuación fijamos nuestro sistema de referencia, diremos que son positivas los sentidos de corriente, - Par y velocidad como a continuación mostramos en la siguiente figura.

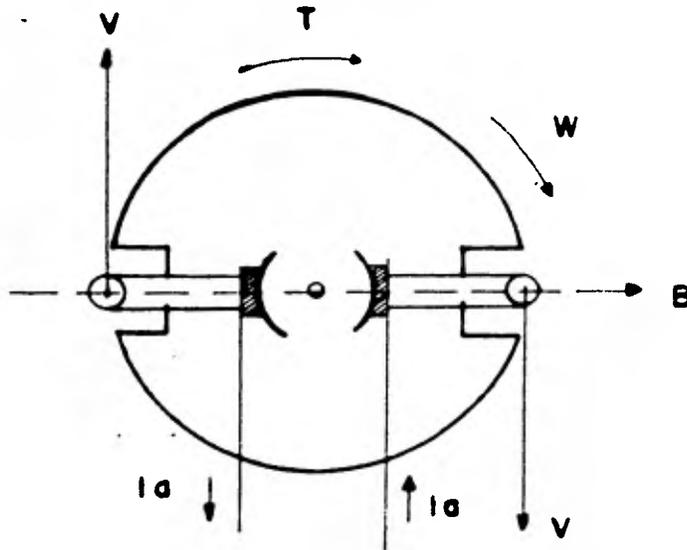


FIG. 3.7.3.

Si aplicamos una carga a nuestro motor este reacciona perdiendo velocidad y entonces:

$$W_m < W_v$$

y esto quiere decir que:

$$E < V$$

Y también aparecen una corriente y un Par positivo:

$$I_a = \frac{V - E}{r_a} > 0$$

$$T_e = K \cdot I_e \cdot I_a > 0$$

Para que se de la transición de la máquina es necesario que la acción motriz se convierta en generatriz y - para que suceda esto tanto el Par como la corriente invierten su sentido y por lo tanto queda:

$$- T_e = K I_e (- I_a) \text{ ----- } 3.5.21$$

para que I_a sea negativa es necesario que $E > V$

Esto se puede dar en solo 3 casos:

- a) Que E aumente por un aumento de la velocidad, - o sea que se disloque la carga
- b) Si aumentamos E , reforzando la corriente de -- excitación I_e
- c) Si se disminuye el voltaje de alimentación de la armadura.

Los dos últimos incisos se refieren a que se le - da la orden de disminuir la velocidad al motor, esto puede presentarse en un proceso de velocidad controlada para el - caso industrial, y para la tracción de los vehículos se pre - senta cuando es posible "frenar con el motor".

Cuando se esta regresando energía el sistema, la energía cinética acumulada, se transforma en energía eléc-- trica, esto también se conoce como frenado regenerativo.

3.8 Motor con excitación en Derivación

Para la condición de excitación en derivación, el análisis del comportamiento es similar, al caso con excitación independiente por lo tanto no es necesario volver a --mencionar todo el desarrollo.

En la siguiente figura mostramos el esquema del motor con excitación independiente

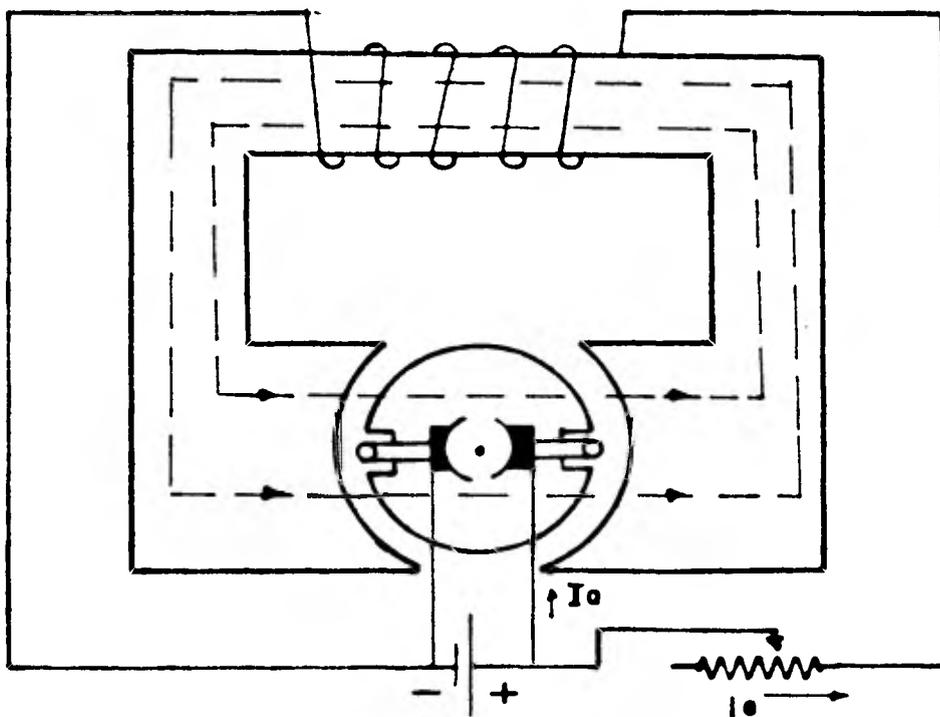


FIG.3.8.1

Si vemos cuidadosamente el esquema de la figura 3.8.1 observamos que al reducir la velocidad, se incrementa la corriente de excitación I_e , y por consiguiente aumenta -

"E", que podría causar una disminución en el voltaje aplicado y muy probablemente no se obtendría el frenado regenerativo.

3.9 Motor con Excitación Serie

En el caso del motor de C.D. con excitación sería, el comportamiento es completamente diferente a los anteriores, en la siguiente figura mostraremos un esquema de sus conexiones.

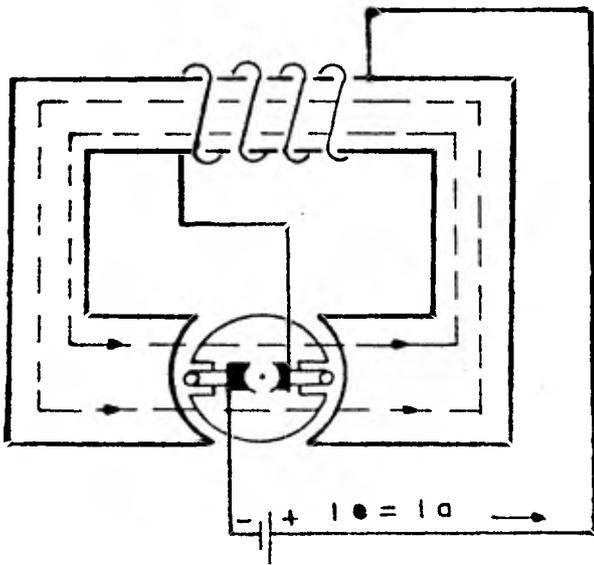


FIG. 3.9.1.

En este motor los sentidos de corriente de armadura, de flujo y Par son los mismos que para los dos casos anteriores.

El análisis del comportamiento comenzará con la igualación de las corrientes de armadura y excitación como-

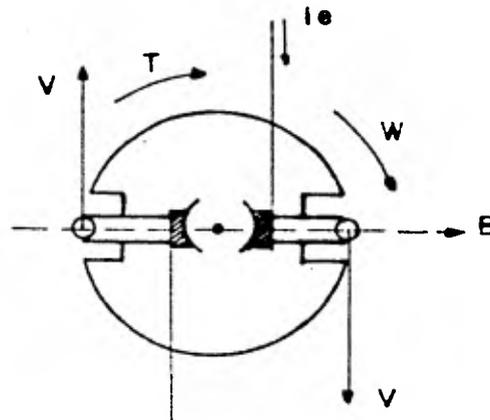


FIG. 3.9.2.

se muestra en la figura 3.9.1

$$I_e = I_a$$

La ecuación de E se transforma a:

$$E = K W I_a \text{ ----- } 3.5.22$$

donde K, hay que considerar que es una función de la corriente ya que:

$$K = \frac{a}{b + I_a} \text{ ----- } 3.5.23$$

El diagrama eléctrico es el mismo que el de la figura , solo "ra" también incluye el valor de resistencia del campo.

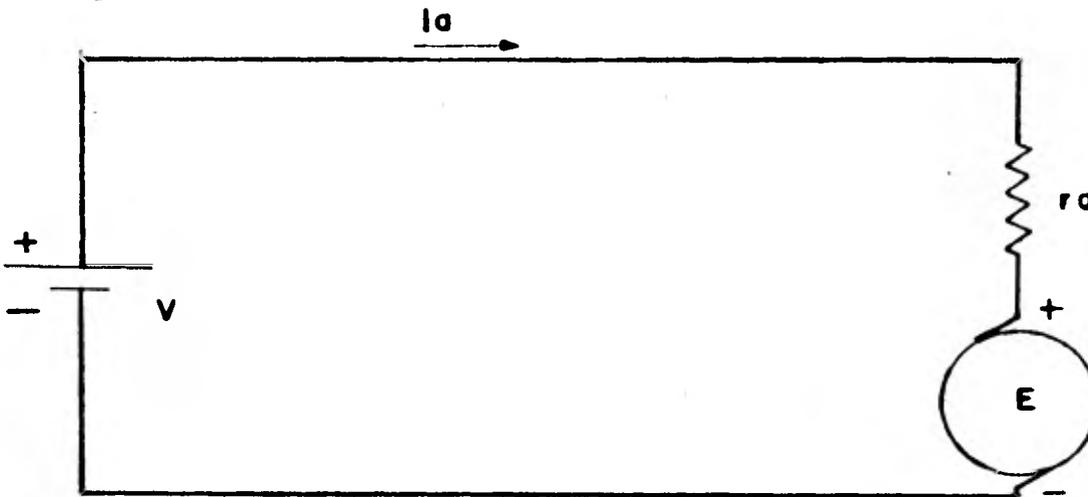


FIG. 3.9.3.

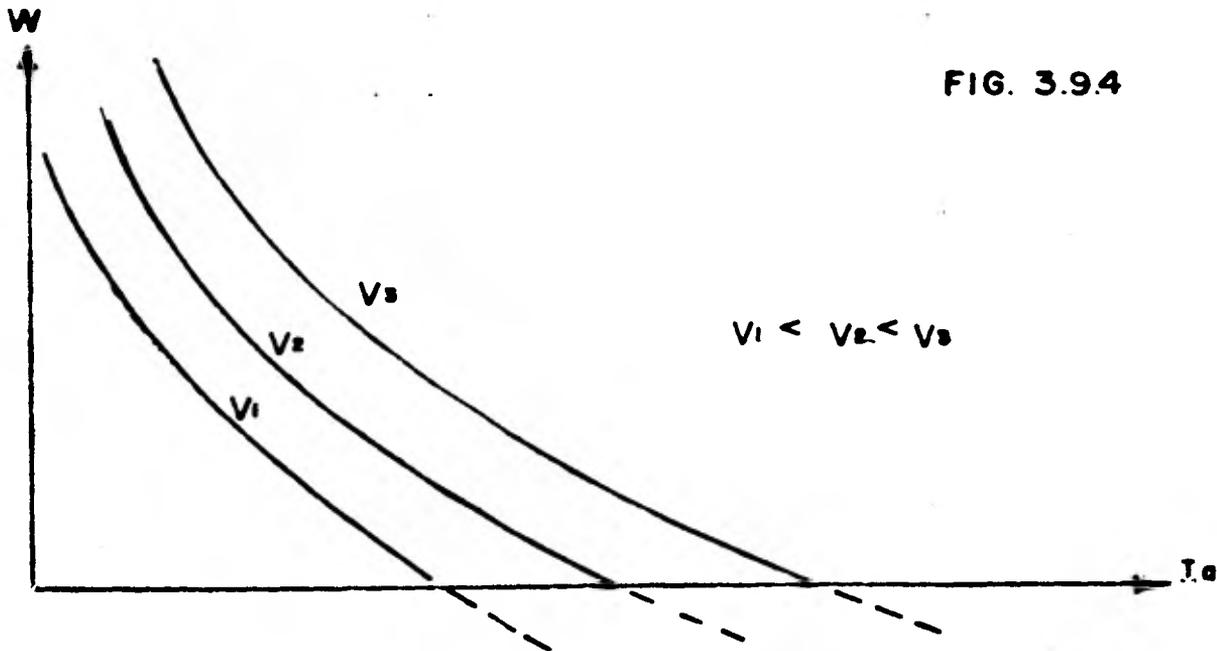
La corriente de armadura está dada por la siguiente ecuación:

$$I_a = \frac{V - E}{r_a} \text{ ----- } 3.5.24$$

Si sustituimos la ecuación 3.5.22 en la 3.5.24 y despejamos la velocidad w .

$$W = \frac{V}{K I_a} - \frac{ra}{K} \text{ ----- } 3.5.25$$

Esta ecuación representa a una familia de Pseudo-hiperbolos para diferentes voltajes, donde si K fuera una constante tendría una asíntota vertical en el eje de las ordenadas, y una horizontal en ra/K por debajo del eje de las abscisas, en la siguiente figura mostramos el esquema.



La ecuación del Par electromagnético sería la siguiente:

$$T_e = K I_a^2 \text{ ----- } 3.5.26$$

Analizando la ecuación 3.5.26 y observando la fi-

gura 3.9.4 vemos, que es ideal para sistemas de tracción vehí-
cular, puesto que tiene un alto Par de arranque y un aumen-
to de velocidad rápido.

Por otra parte tiene grandes desventajas puesto -
que su velocidad no tiene un punto de estabilidad bien de--
terminado y si por algún motivo, la carga se desbocara la -
máquina sigue incrementando su velocidad, aunque el Par se
debilita, si esta condición continúa el motor puede llegar-
a destruirse.

Si intentáramos que la máquina disminuyera su ve-
locidad, reduciendo el voltaje aplicado, lo que sucedería -
sería que la corriente se debilitaría y encontraría otro --
punto de equilibrio, pero seguiría incrementando su veloci-
dad, debido a que el motor no pierde tracción.

En la siguiente figura mostramos lo que acabamos-
de analizar.

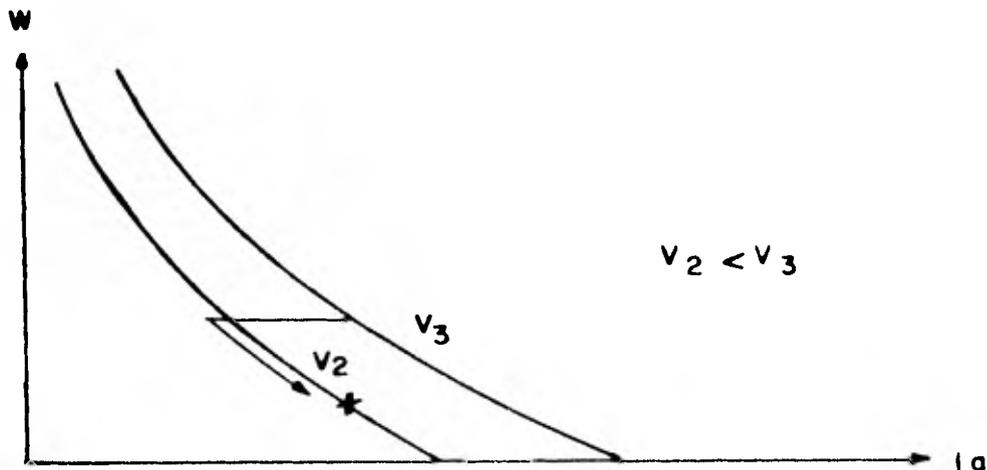


FIG. 3.9.5.

Si quisieramos obtener, un frenado dinámico, colocando una resistencia de carga, sería necesario un cambio - en las conexiones del campo para que la máquina trabajando como generador levante voltaje, debido a que la corriente - que se induce en la línea, su campo magnético anula al magnetismo remanente.

Si efectuamos el cambio en las conexiones del campo entonces obtendremos un voltaje:

$$E = Kw I_a \text{ ----- } 3.5.27$$

en donde:

$$K = \frac{a}{b + I_a} \text{ ----- } 3.5.28$$

y del siguiente diagrama, obtenemos la corriente de armadura.

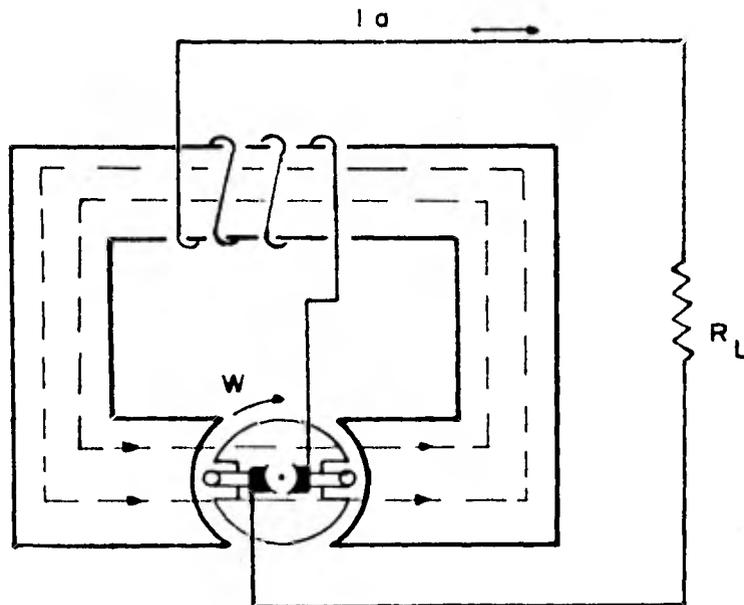


FIG. 3.9.1.

$$I_a = \frac{E}{r_a + R_L} \text{ ----- } 3.5.29$$

Sustituyendo 3.5.28 y 3.5.29 en 3.5.27

$$E = a W - b(r_a + R_L) \text{ ----- } 3.5.30$$

En donde vemos que mientras el valor de la resistencia de carga sea menor, mayor es la fuerza electromotriz FEM.

En donde en estas condiciones se genera un Par negativo debido a que la corriente en la armadura es negativa aunque en el campo es positiva.

$$T_e = K_a I_a (- I_a) \text{ ----- } 3.5.31$$

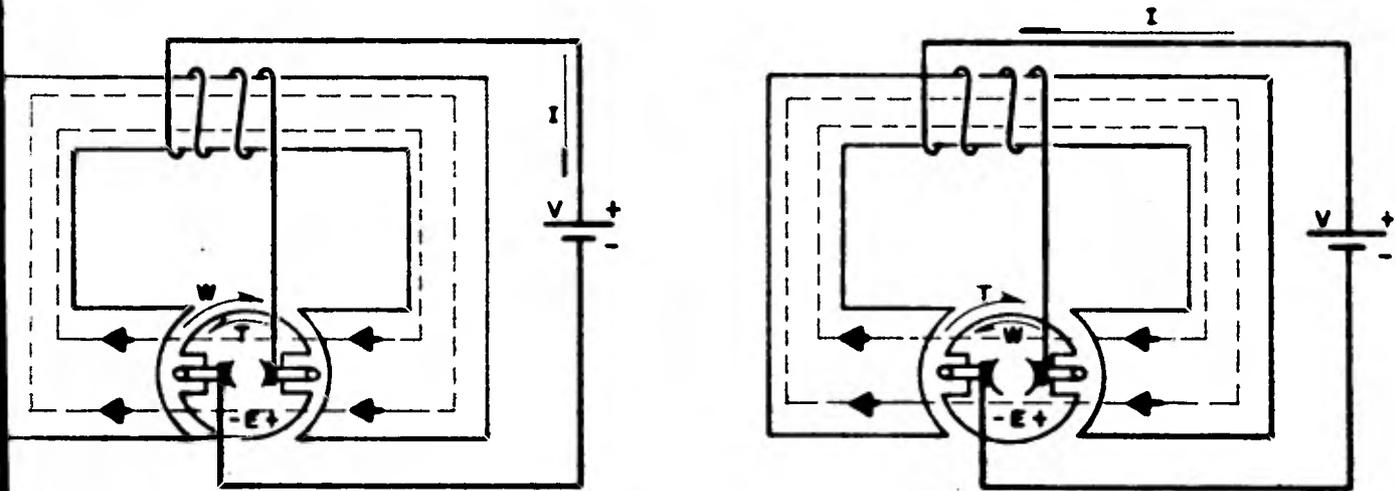
El frenado que se obtiene bajo estas circunstancias se llama "frenado dinámico".

Si se desea cambiar el "frenado dinámico" por -- "frenado regenerativo", es necesario siempre mantener el valor de $E > V$, sino de lo contrario, se corre el riesgo de -- que al momento de que $E < V$, se invierta la corriente de armadura, lo cual nos invierte el campo y nos consume energía de la fuente y la corriente queda dada por:

$$I = \frac{V + E}{r_a} \text{ ----- } 3.532$$

En las siguientes figuras ilustramos los dos casos de $E > V$ y $E < V$.

FIG. 3.9.7



a). REGENERATIVO SI $E > V$

b). DESTRUCTIVO SI $E < V$

También hay que analizar aquí como se invierte el flujo y corriente, el Par conserva el sentido de frenado, - lo que constituye un intento de invertir la velocidad de la máquina, lo que podemos describir como un "arranque a con--travelocidad".

Esto nos conduce a concluir que así como la máquina tiene grandes ventajas en tracción también tiene grandes desventajas en el frenado regenerativo; donde de estas desventajas, pueden superarse recurriendo a lo siguiente:

- a) trabajando como motor serie en tracción, y como generador independiente en frenado regenerativo.
- b) Absorbiendo la energía del frenado regenerativo en una fuente de tensión variable para que-

siempre la fuerza electromotriz se mantenga en un valor mayor de voltaje que la fuente de alimentación

- c) Por medio de una máquina mixta, con excitación serie en tracción y excitación independiente - de baja corriente en frenado regenerativa.

Cualquiera de las opciones que se escoja, hace, - necesario conmutar las conexiones, lo cual motiva que la maquina no tenga una transición continua entre las operaciones de tracción y frenado.

C A P I T U L O I V

OPCIONES DE CONTROL PARA EL MOTOR DE C.D.

4.1. Criterio de Selección

Para seleccionar el tipo de excitación más conveniente para nuestro motor, primero expresaremos las condiciones que deseamos que reuna la maquina de C.D.

- 1.- Es importante que la aceleración de la máquina sea constante, y no escalonada para evitar los efectos transitorios, que son molestos para el confort de los pasajeros que viajan en un vehículo impulsado por una máquina de C.D.
- 2.- Se necesita que el tipo de excitación que tenga la máquina de C.D. nos ofrezca un rango de velocidad, bastante amplio para poder satisfacer las necesidades de locomoción de un vehículo, que son desde el reposo hasta alcanzar una velocidad adecuada. Que esto podría ser expresado en el motor de C.D. desde 0 hasta una velocidad necesaria que puede tomar un valor superior a las 1000 r.p.m.
- 3.- También es importante que la transición de la máquina de C.D. no presente muchos problemas, sino por el contrario que la tracción --

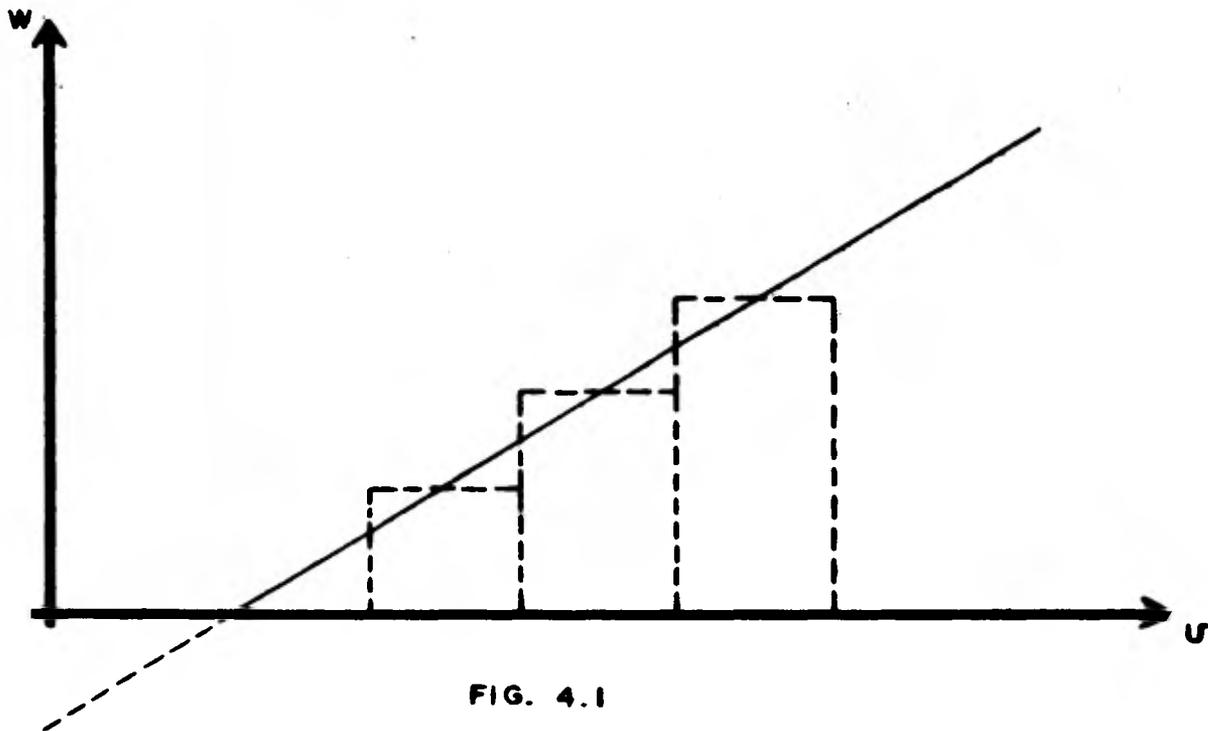
sea lo mas directa posible, para que el sistema de regeneración tenga una eficiencia optima. Por lo tanto el tipo de excitación, que sea -- seleccionado debe cumplir también con esta con dición.

Si analizamos el comportamiento que presenta el motor de C.D. con excitación independiente, vemos que su -- curva de velocidad presentan las siguientes características.

La ecuación que nos da la gráfica, de velocidad -- con Par constante es la siguiente (ver cap. III)

$$W = \frac{1}{K_e} V - \frac{r_a (T_M + T_f)}{K_e^2} \text{ ----- } 4.1$$

La gráfica correspondiente sería la siguiente:



Si observamos la gráfica vemos que el cambio entre un punto y otro, es en forma escalonada, lo cual repercutirá en el vehículo como cambios bruscos en la marcha del vehículo.

Para obtener la regeneración, sabemos que no es necesario, hacer ningun cambio físico en las conexiones del motor, solo debemos mantener la condición ya enunciada de que $E > V$ para que la corriente de armadura regrese a la fuente de alimentación, y se cumpla con la regeneración.

También es conveniente hacer notar que en este caso el motor con excitación independiente, tiene 2 puntos de alimentación, una para el campo y otra para el circuito de armadura, por lo tanto la regeneración que se obtendría no sería completa, debido a que la fuente del campo, siempre estaría suministrando energía.

En el caso del motor con excitación en derivación, el comportamiento de las curvas de velocidad son diferentes puesto que en este caso la armadura y el campo se encuentran en paralelo.

La ecuación que nos interesa analizar sería la que relacionará la variación de la velocidad con carga constante, y corriente de excitación variable, ecuación 3.5.11.

$$W = \frac{(aV - raTM - raTf)I_{exc}^2 + (abV - braTM - braTf)I_{exc} - b^2ra}{a^2I_{exc}^2} \quad \frac{(TM+Tf)}{a} \quad \text{--- 3.5.11}$$

Esta ecuación como ya estudiamos tiene dos puntos importantes que no deben descuidarse que son el límite inferior y el límite superior, sino se atendieran estas condiciones se correría el riesgo de averiar la máquina, en el caso de rebasar el límite inferior.

El límite superior viene dado por la siguiente expresión (3.5.12)

$$I_{exc} (\text{min}) = \frac{b (TM + Tf)}{a I_{L \text{ nom}} - (TM+Tf)} \quad \text{---- 3.5.12}$$

El límite inferior viene dado por la siguiente expresión (3.5.13)

$$I_{exc} (\text{max}) = \frac{V}{rc} \quad \text{--- (3.5.13) } \quad rc = \text{resistencia de campo}$$

La gráfica de la ecuación 3.5.11 sería la siguiente de W contra corriente de excitación I_{exc} .

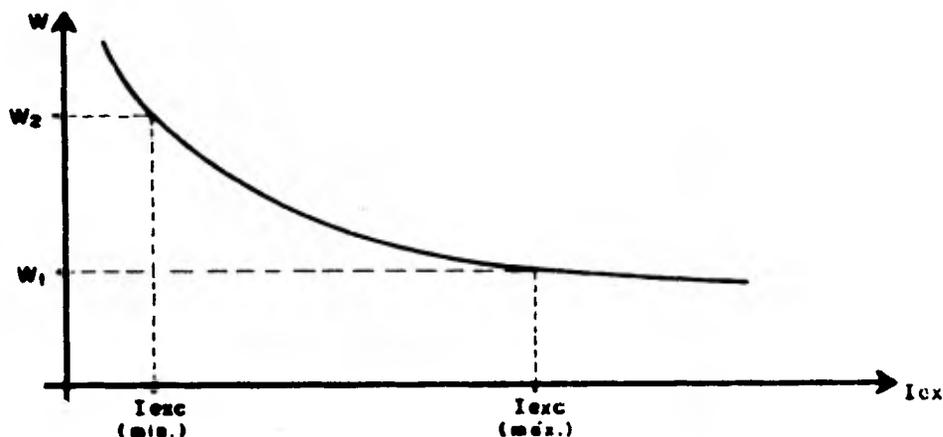


FIG. 4.2

Si observamos la grafica de la figura 4.2, vemos que el rango de velocidad que podríamos obtener:

$$W_2 - W_1$$

Es pequeño para lo que necesitamos, puesto que como ya lo habíamos mencionado, necesitamos un rango de velocidad muy amplio, o sea desde 0 hasta una velocidad que podría llegar a ser superior a las 1000 R.P.M.

Volviendo a la curva vemos que tiene dos asintotas una vertical y otra horizontal, si analizamos la asintota vertical, vemos que si se debilita considerablemente la corriente excitación, se dispara la velocidad lo cual puede ser muy peligrosa, puesto que puede destruirse la máquina.

Por el otro lado, hacia la asintota horizontal, vemos que con grandes variaciones de la corriente de excitación se obtienen pequeñas variaciones en la velocidad, puesto que estamos en una región de alta saturación magnética de la máquina.

También por otra parte el sistema regeneración no necesita ningun cambio en las conexiones del motor solo debemos mantener la condición, antes enunciada de que $E > V$, para que exista una corriente hacia la fuente de alimentación y se pueda suministrar energía también, o sea que se cumpla con la regeneración.

Tanto en este caso, como en el del motor con excitación independiente para lograr la regeneración se necesita una fuente de alimentación de voltaje controlada.

Para el caso del motor con excitación en serie el comportamiento de su curva de velocidad con Par constante - es muy similar a la curva del motor con excitación independiente en las mismas condiciones.

La ecuación que nos da el comportamiento es la siguiente:

$$w = \frac{(b + I_L) V - (r_a I_L^2 + r_a b I_L) P}{a I_L + (b + I_L) P} \quad \text{---- 4.2.}$$

En esta ecuación hay un parámetro importante que es el voltaje de arranque (V_a), puesto que se necesita un cierto voltaje mínimo de arranque, para tener un Par adecuado.

La gráfica sería la siguiente:

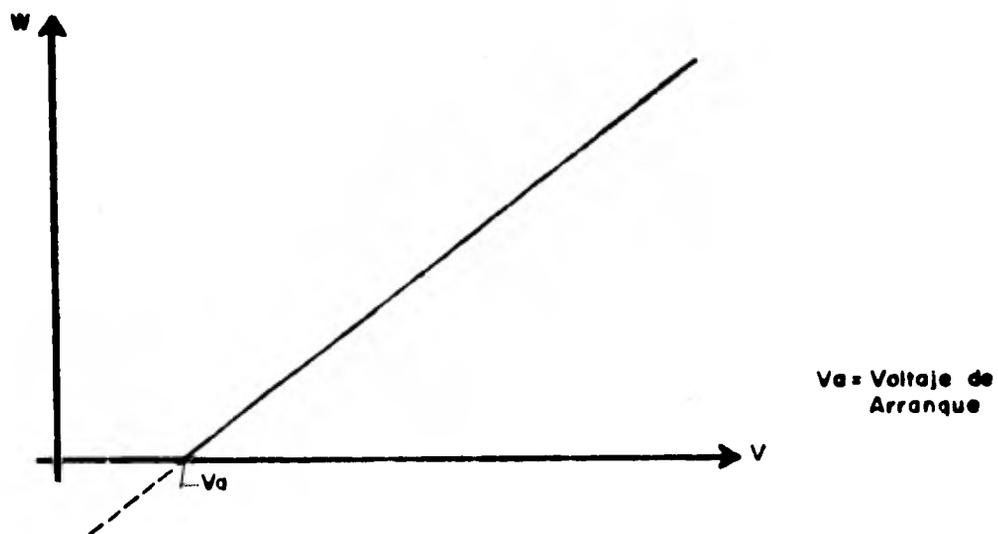


FIG. 4.3

V_a = Voltaje de arranque

Si observamos esta curva vemos que podemos obtener un rango muy amplio de velocidades, pero a cambio de esto tenemos problemas serios con la estabilidad del comportamiento del motor.

Como ya habíamos estudiado este motor es muy inestable, dado a que la corriente de línea adquiere valores -- muy altos en el arranque del motor.

Esta situación de la elevación del valor de la corriente de línea (I_L), viene a que el Par esta dado al cuadrado de la corriente de línea, y el Par máximo se presenta al arranque.

También, se presenta el problema de que se puede desbocar la velocidad del motor, si se quedara sin carga o sea que el Par se redujera solo al de fricción, en este, caso la velocidad se incrementaría tanto que podría provocar el estallamiento de la armadura por fuerzas centrífugas.

Para la tracción vehicular se necesita, regular -- muy bien el voltaje, puesto que si aplicamos un voltaje insuficiente resulta en un Par muy debil al arranque, y si aumentamos el voltaje se obtiene una aceleración mejor, pero se provoca un calentamiento de la máquina por sobrecorriente.

En el aspecto de regeneración esta maquinaria presenta algunos problemas serios, puesto que se tiene que cambiar las conexiones del motor, en el campo para poder obtener la regeneración, lo cual implica unas adaptaciones al motor algo sofisticadas.

En este caso también para poder obtener la regeneración, se tiene que cumplir la condición de que $E > V$, para que exista una corriente hacia la fuente de alimentación, y reciba una cierta energía para que se cumpla la regeneración.

En general este motor es muy inestable, por las variaciones en la corriente de línea (I_L). Y en su regeneración presenta también más problemas que los otros dos tipos de excitación.

Al analizar las curvas de comportamiento de velocidad de los diferentes tipos de excitación del motor de -- C.D., vemos que ninguno cumple con las características de-- seadas.

Por lo tanto propondremos una combinación entre el motor con excitación en derivación y el motor con excitación independiente, dando a este nuevo tipo excitación el siguiente nombre, MULTIDERIVADO. En este nuevo motor, tendremos varios devanados de campo y fuentes de alimentación en paralelo con la armadura. En la siguiente figura se ilus

tra como sería un diagrama de conexión.

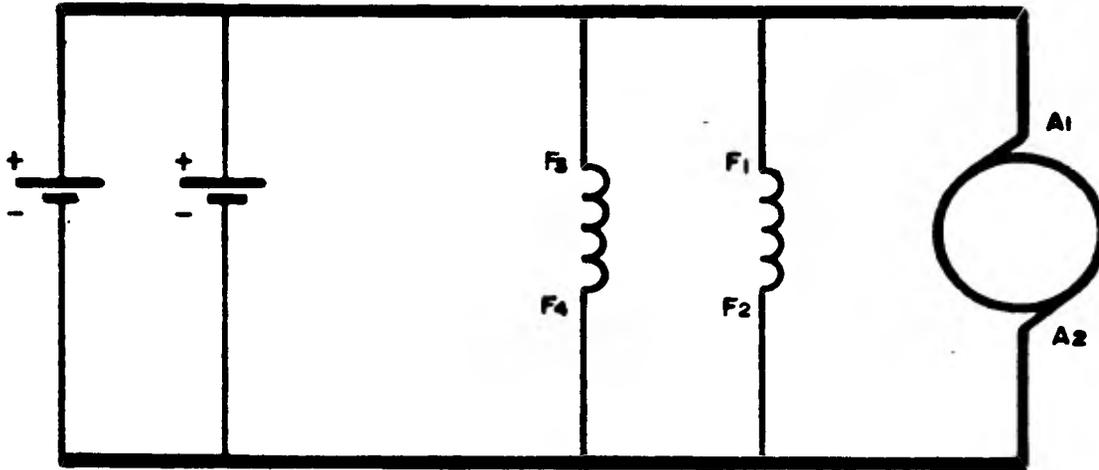


FIG. 4.4

Basicamente el control que estableceremos para el motor multiderivado, sera a base de estar conectando en serie y en paralelo varias fuentes de alimentación y devanados de campo, como se muestra a continuación en las siguientes figuras.

PARALELO

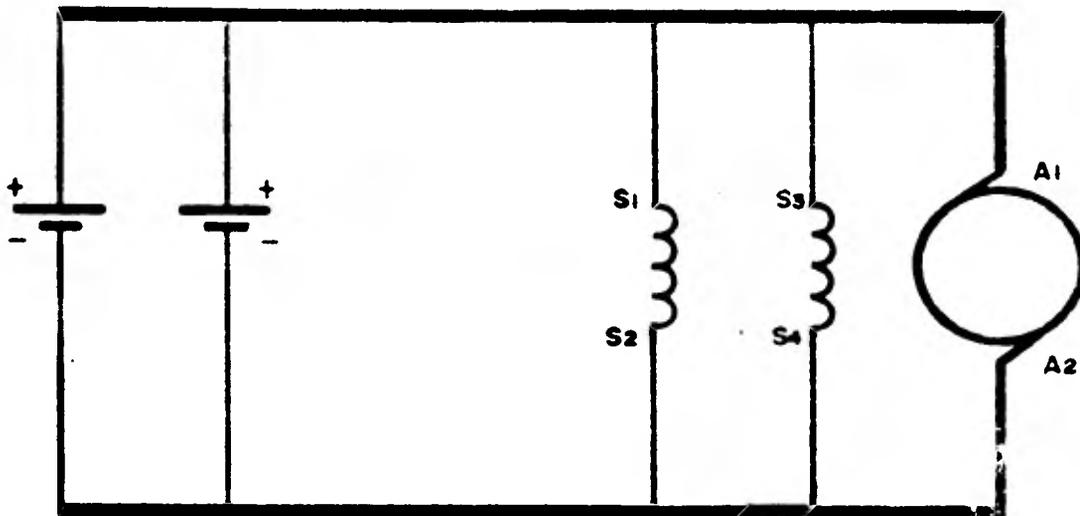


FIG. 4.5

S E R I E

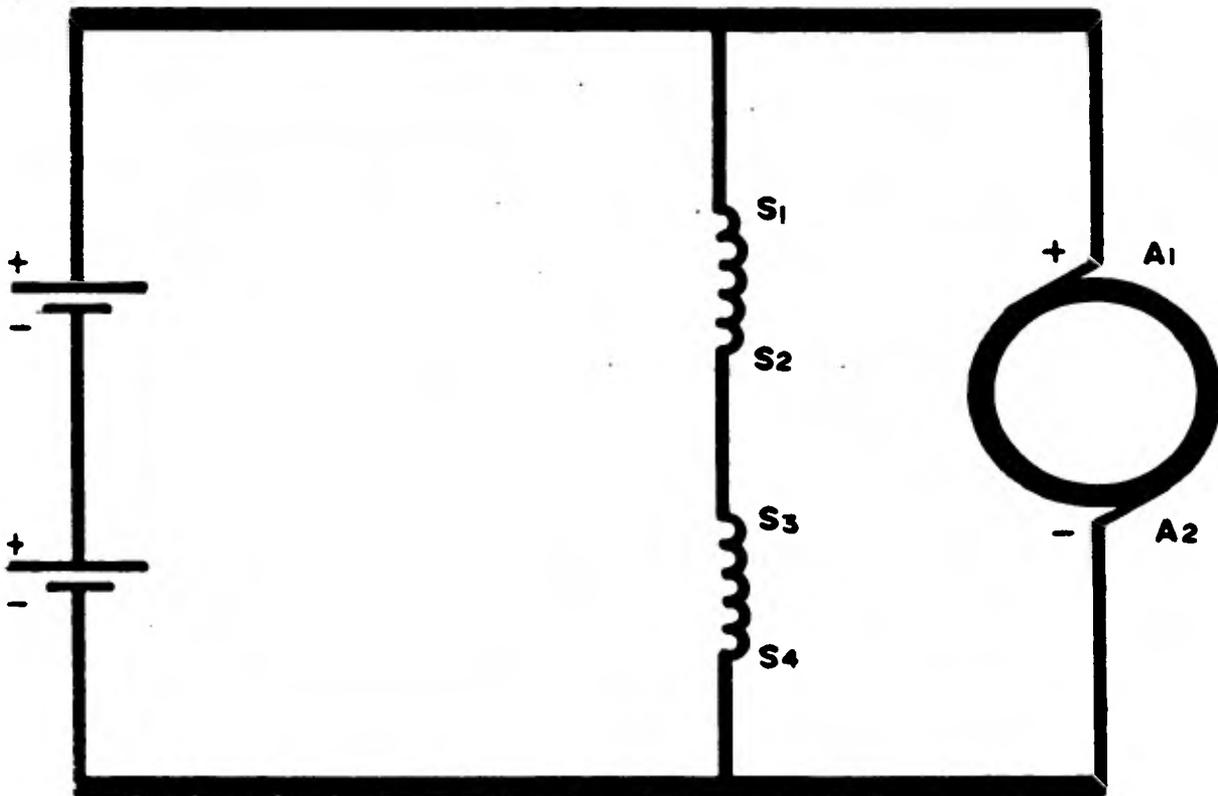


FIG. 4.5

Como vemos en los diferentes arreglos siempre la armadura queda en paralelo con los devanados de campo y las fuentes de alimentación.

La conexión de los campos en paralelo y serie entre sí, como la conexión de las fuentes de alimentación también en serie y paralelo, se debe a que así podemos controlar de acuerdo a nuestras necesidades, la velocidad (ω) y Par (T_e) para lograr un sistema de tracción adecuado a las-

condiciones requeridas para el movimiento del vehículo.

Donde las curvas de comportamiento de velocidad -- (W) Par (Im) y voltajes serán obtenidas y analizados posteriormente.

Los valores de los parámetros, como fuerza magnetomotriz, Par, voltaje y corriente serán obtenidos de acuerdo a las características mecánicas, que resulten necesarias en la tracción del vehículo.

4.2 Control Electrónico de Motores de C.D.

Consideraciones Generales

Para diseñar un control para un motor, es necesario que se analicen los parámetros que se desean controlar del mismo, como pueden ser: velocidad, aceleración, Par y potencia suministrada, en algunas ocasiones se puede llegar a necesitar saber la temperatura para diferentes puntos.

Al conocer los parámetros mecánicos del motor, entonces podemos controlar sus parámetros eléctricos y lograr así el sistema de control que deseamos, puesto que los parámetros mecánicos y eléctricos están relacionados entre sí.

En la siguiente figura ilustraremos el diagrama completo de control de un motor incluyendo la carga y la fuente de energía.

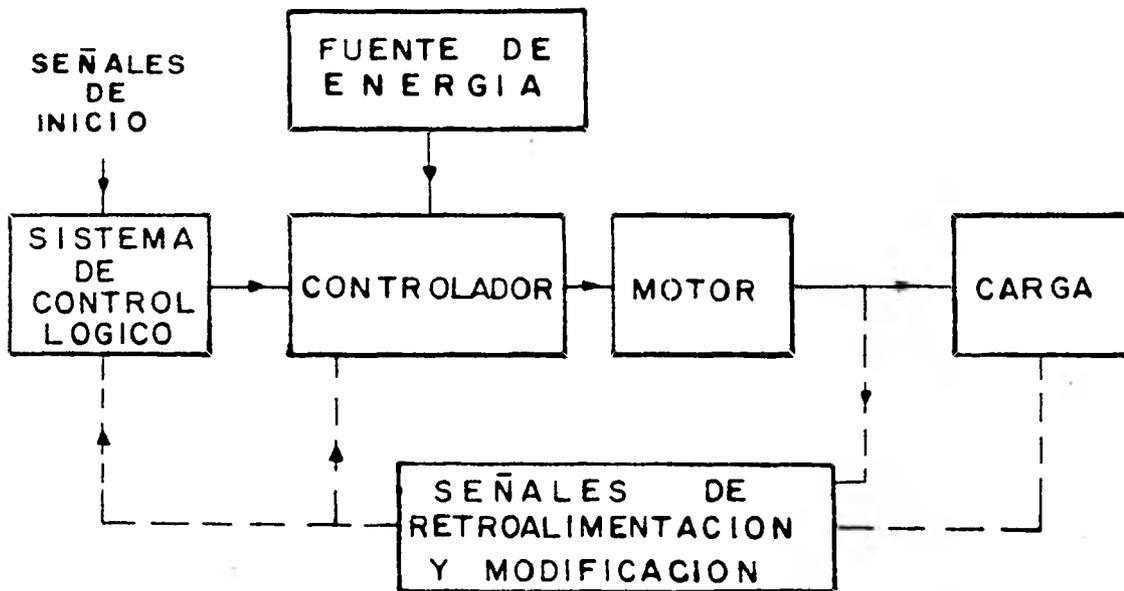


FIG. 4.2.1.

La figura 4.2.1. simplemente representa la topología general de los elementos principales del control de un motor.

Las distintas estructuras de los materiales de -- los semiconductores de potencia usados en el control de motores, son muy diferentes de los elementos electromecánicos.

Es muy importante establecer, las diferentes características de los elementos de control constituidos por elementos semiconductores y electromecánicos como también -- con las características de los motores.

4.3 Características de los Semiconductores de Potencia

Las principales características y diferencias pueden ser numeradas, y serían las siguientes:

- 1.- Las características termicas de los elementos semiconductores son muy diferentes a las de los elementos -- electromecánicos y de los motores. Los motores tienen una gran capacidad termica, y pueden soportar sobrecargas termicas por periodos de minutos. Los semiconductores en cambio tienen una pequeña capacidad termica, y no pueden soportar sobrecargas de períodos de tiempo largas, solamente las soportan durante un segundo sin que se dañen.
- 2.- La corriente de sobrecarga característica de los dos tipos de elementos del sistema son muy diferentes, y esto también está dado por sus capacidades termicas. Las semiconductores tienen una capacidad pequeña de sobrecorrientes, en cambio los motores pueden soportar durante periodos largos de tiempo sobrecorrientes, -- siempre que no se rebasen sus características termicas máximas.
- 3.- Algunos semiconductores, como los tiristores pueden soportar sobrecorrientes, pero no se comparan con la capacidad de los motores.

- 4.- Los circuitos de semiconductores son muy susceptibles a la interferencia electromagnética como la inducción, - cosa que no se da en los motores o sea que no se afectan en la misma medida.
- 5.- Los semiconductores también son muy sensibles a las vibraciones cosa que también no afecta seriamente a los motores, a los semiconductores solo se les pueden aplicar leves vibraciones.
- 6.- Los motores pueden operar con sus ondas de voltaje y - corriente irregulares en un rango amplio situación que en los semiconductores no se puede dar puesto que inmediatamente empiezan a tener un mal funcionamiento y -- por lo tanto es necesario rectificar las ondas de en--trada al sistema de semiconductores.

4.4. Tipos de Semiconductores de Potencia

Muchos tipos de semiconductores son utilizados en la - electrónica para el control de motores.

El tipo a ser usado en cada aplicación, depende de un- número de factores, principalmente están la potencia, voltaje y la corriente requeridos por el motor a ser controlado.

Hay otros factores que intervienen para situaciones -- particulares, como son la temperatura, el tipo de control - a se utilizado, también otro factor que interviene es el --

costo del sistema.

En esta sección describiremos las principales características que debe tener un semiconductor de potencia - en el control de un motor.

Los semiconductores de potencia están asociados - a otros circuitos de semiconductores del circuito de control del motor. En la figura 4.2.1 el bloque de controlador contiene el circuito de semiconductores de potencia. El control de un motor requiere de varios circuitos, aparte de -- los circuitos de potencia para poder funcionar con las características requeridas.

Los otros circuitos que también se requieren, son los circuitos de "lógica" o sea control lógico, esta parte es muy importante pues es en donde está o se tiene el tipo, modo y filosofía del control del motor para obtener el funcionamiento que deseamos.

En el mercado existen diferentes tipos de semiconductores de potencia, de acuerdo a diferentes necesidades - que se pueden presentar.

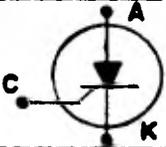
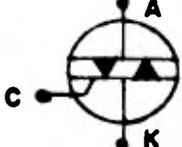
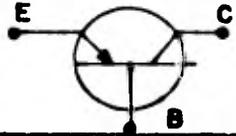
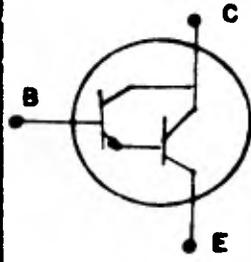
A continuación presentamos una tabla 4.4.1 con -- los tipos de semiconductores más, usuales que existen, con sus máximas capacidades de voltaje y corriente.

En la columna de símbolos, las A, K, G, E, C y B

se refieren a el anodo, catodo, fuente, emisor colector y - base respectivamente.

También esta incluido el díodo zener, aunque no es un semiconductor de potencia es el empleado como un controlador de voltaje, y es aplicado en muchos tipos de control para motor.

TABLA 4.4.1

Elemento	Simbolo	Máxima	Capacidad
		Volts	R m s Amps.
Rectificador de silicio		5000	7500
SCA: Rectificador controlado de silicio		5000	3000
TRIAC: switch bidireccional		1000	2000
Transistor de potencia		3000	500
Darlington		1000	200
Diodo Zener		500	

Los semiconductores aquí listados pueden ser aquí clasificados de acuerdo a su estructura; como los elementos de dos junturas como el rectificador de silicio, los elementos de tres junturas como los transistores de potencia y -- por ultimo los elementos de cuatro junturas, conocidos también como tiristores (p n p n).

Todos estos elementos tienen su aplicación en el control de motores, de acuerdo a las necesidades específicas de cada caso.

4.5. Control Chopper

El principal control de conmutador, aplicado al control de motores de corriente directa cuando la fuente de alimentación es de corriente directa, es un control de voltaje básicamente.

Este control es usado en sistemas de baterías --- energizadas, como los motores de velocidad variable, utilizados en los vehículos eléctricos.

A este control se le ha dado el nombre de CHOPPER debido a que establece un switch entre el voltaje de la --- fuente y el voltaje de la carga, donde este switch abre y cierra periódicamente, Originalmente este circuito fue utilizado como control de voltaje.

El mecanismo de este control de voltaje, se basa-

en que el voltaje a la carga debe de mantenerse constante, - y cuando hay variaciones considerables en la fuente, el control abre y cierra.

El control Chopper de motor difiere del regulador de voltaje en que el rango de voltaje es muy amplio, va de de cero hasta el voltaje máximo del motor. En la siguiente- figura mostramos un circuito del control Chopper

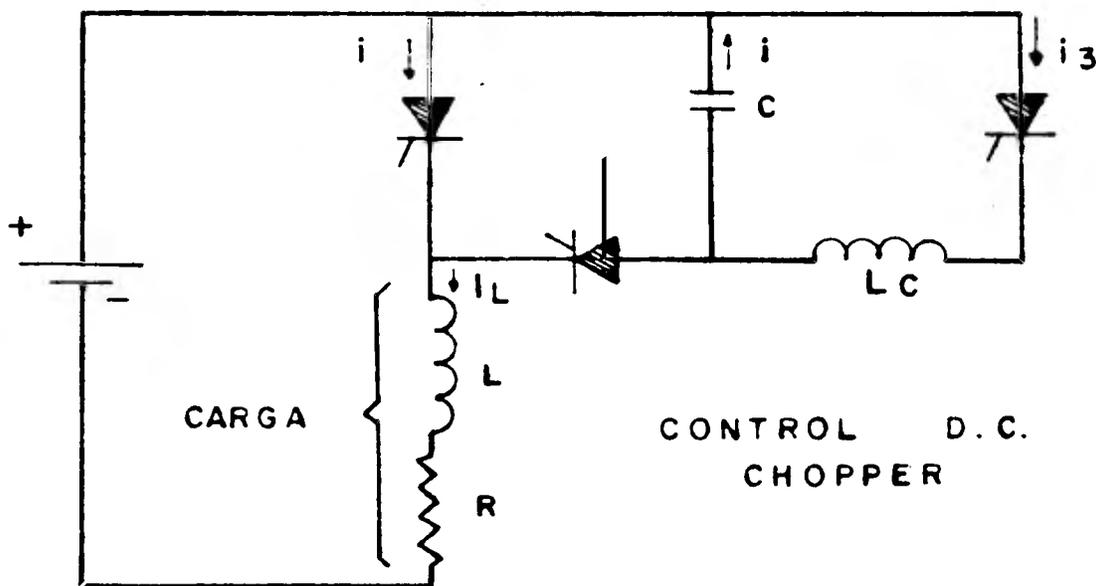


FIG. 4.5.1.

Los controles Chopper para motores comercialmente, utilizan transistores de potencia; Darlinglón, SCRS, etc.

Podríamos seguir mencionando otros tipos de control electrónico que existen, pero con seguridad podemos de cir que ninguno se adapta a nuestras necesidades, dado a -- que como ya hemos mencionado anteriormente, son delicados -

a los esfuerzos termicos, mecanicos, eléctricos etc.

Por otra parte, si enfocamos esto desde un punto de vista económico, vemos que el costo de cualquiera de estos sistemas electronicos es elevado lo cuál nos dispararía en cuanto a costo, el vehículo.

Esto si lo vemos de la siguiente forma se entendería mejor.

Si consideramos un prototipo de un vehículo popular, que constara de las partes necesarias para su funcionamiento, esto por supuesto que sin reducir la seguridad de las personas que viajaran en él. El sistema de control electrónico, podría equipararse en precio con el resto del vehículo.

Por lo tanto hemos decidido, por un sistema de control del tipo eléctrico a base de contactores y otros elementos eléctricos.

4.6. Control de Tipo Eléctrico

Para comenzar nuestro diseño, es necesario primero por analizar cuales serán nuestros requerimientos, para lograr así un buen diseño.

Si analizamos lo que necesitamos, es un sistema de control que pueda lograr lo siguiente:

Poder conectar en serie y paralelo las baterías - de la fuente de alimentación, junto con los campos de excitación de la máquina de C.D.

Esto lo podemos conseguir mediante contactores y otros elementos, colocandolos de tal forma para conseguir - el paralelo y serie de las baterias y campos del motor.

Esto se hace con la finalidad de ir obteniendo -- Par o velocidad, según sea el caso de lo que se necesite. - Al instante del arranque necesitamos, que las baterías y -- campos esten en paralelo, para lograr así el mayor Par de - arranque.

Una vez que el vehículo ha conseguido desplazarse - ya no es necesario mantener un Par elevado, sino lo que necesitamos es incrementar la velocidad y por lo tanto tene-- mos que conectar en serie las baterias y campos del motor, - para lograr incrementar la velocidad del motor. Esto queda - justificado con el análisis que hicimos en el Cap. III.

Y posteriormente lo podremos ver en las curvas de comportamiento que se obtuvieron, en las pruebas de labora- torio.

En el siguiente circuito eléctrico, mostramos co- mo se puede lograr la combinación serie-paralelo, con dos - baterias de alimentación para el motor de C.D.

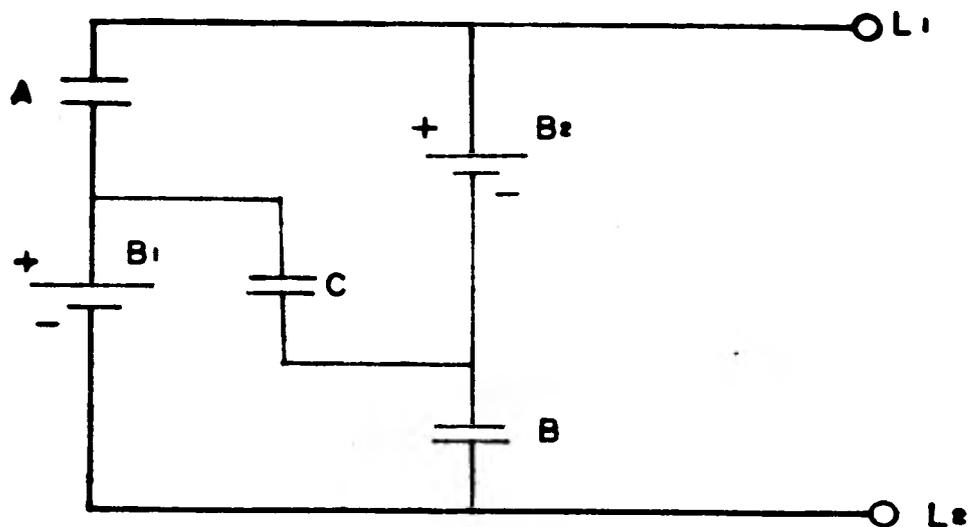


FIG. 4.6.1

El funcionamiento de este circuito es el siguiente, al encontrarse abierto el contactor C y cerrados los -- contactores A y B₁ las baterías B, y B₂ se encuentran en pa ralelo.

Por otra parte, si abrimos los contactores, A y B y cerramos el contactor C, encontramos que las baterías B₁ y B₂, estarán conectadas en serie.

Necesitamos que las baterías y los circuitos de - campo, siempre se encuentren ambos en la misma condición, o sea que si las baterías están en serie, los circuitos de -- campo también, y si se encuentran en paralelo, en la misma- condición deben estar los circuitos de campo. Por lo tanto- el circuito eléctrico es el mismo que para las baterías y - los circuitos de campo del motor.

El circuito eléctrico que mostraremos a continuación con 2 circuitos de campo, su forma de operar será --- igual que en el caso de las 2 baterías.

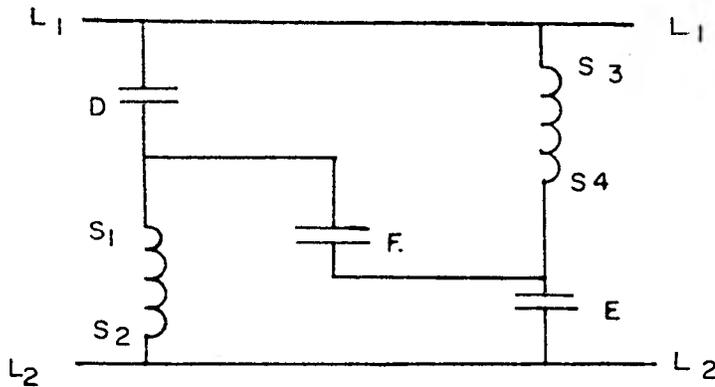


FIG 4.6.2.

En el circuito de armadura lo único que necesitamos es invertir el sentido de la corriente para lograr así la inversión en el sentido de rotación para poder así lo--- lograr el movimiento atrás y adelante del vehículo, esto tam bién se puede realizar mediante contactores. Esto es median te 2 pares de contactores, como se muestra en la figura -- 4.6.3

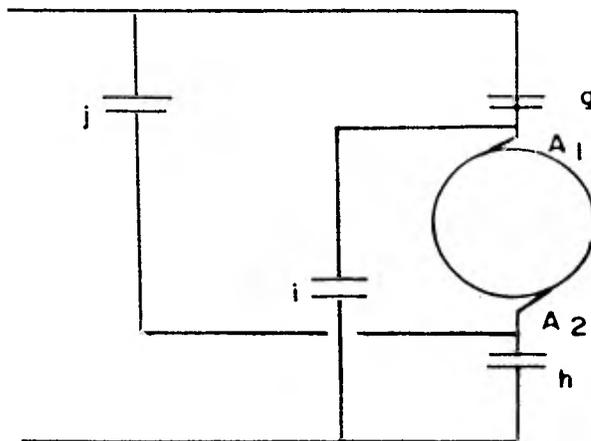


FIG. 4.6.3.

Este circuito opera de la siguiente manera, al encontrarse cerrados los contactores g y h, y abiertos los -- contactores j e i, entonces la corriente esta fluyendo de A1 a A2 y tiene un sentido de giro la armadura. Cuando deseemos invertir el sentido de giro de la armadura solo tenemos que detenerla y al encontrarse en reposo desenergizarla abrir los contactores g y h y cerrar los contactores, J e j y volver a energizar y conservando la misma polaridad de las baterias de abmentación, y asi habremos logrado la inver--- sión en el sentido de rotación de la armadura, puesto que la corriente fluiría de A2 a A1.

A continuación mostramos un circuito completo del sistema de control, con las fuentes de alimentación, los -- campos y la armadura.

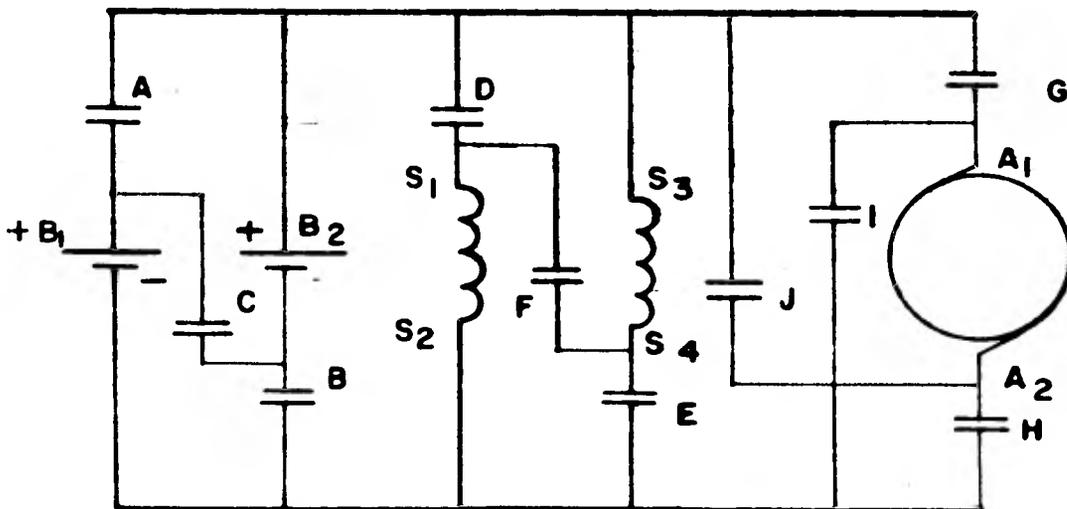


FIG. 4.6.4.

Como podemos apreciar el circuito no es nada complicado sino por el contrario es muy sencillo, y también podemos decir que es económico puesto que sus partes son sencillas de construir. Por lo que consideramos que en lo que más conviene por lo que se refiere al sistema de control -- del motor.

Por otra parte comparativamente con cualquier sistema de control electrónico, ofrece muchos menos problemas operativos en general.

C A P I T U L O V

PRUEBAS DE LABORATORIO

En este capítulo expondremos los resultados que se obtuvieron de una máquina de C.D., que se utilizó para experimentos. También expondremos un ensayo sobre la aplicación de la teoría de la mecánica del movimiento del automóvil expuesto en los primeros capítulos.

Comenzaremos por la máquina de C.D., primero obtendremos la curva de saturación en vacío y la ecuación de Froelich. En segundo término veremos el comportamiento del Par (T_e) y la velocidad (W) de la máquina de C.D.

Los datos de placa de la máquina de C.D. de pruebas son las siguientes:

K.W. = 2.4/3.6 Amps = 1000 resistencia de armadura -
medida (ra)

Volt = 24/36 N = 1000 r.p.m. ra = 0.19

5.1 Determinación de la Curva de Saturación en -- Vacío

La primera prueba que se le hizo, fué la de obtener, su curva de saturación en vacío, para poder así determinar la ecuación de aproximación de Froelich. Puesto que -

como ya mencionamos juega un papel muy importante, debido a que con ella podemos visualizar con una exactitud considerable el comportamiento de la máquina de C.D. en cuanto a sus parámetros principales, como Par, velocidad, voltaje ect. - que son muy importantes para nuestro estudio.

La forma en como vamos a obtener la curva de saturación en vacío será:

Trabajando la máquina de C.D. como generador empleando como fuente motriz otro motor acoplado a la máquina de C.D. y tomando en cuenta las siguientes condiciones.

- 1.- Llevar la máquina hasta su velocidad nominal
- 2.- Excitar el campo de la máquina de C.D. hasta llegar si es posible, hasta un 150% de su valor nominal
- 3.- Las lecturas siempre deben ser tomadas en forma ascendente para evitar discontinuidades, - debido a la histeresis.

A continuación presentamos la tabla de lecturas - obtenida.

Tabla de Lecturas

I_c = corriente del circuito de campo en (AMps)

E = tensión del circuito de armadura en (volts)

	Ic (Amps)	E (volts)
1.-	0	2
2.-	0.12	4
3.-	0.26	7.5
4.-	0.38	10.0
5.-	0.54	14.0
6.-	0.70	18.5
7.-	0.90	23.0
8.-	1.0	25.0
9.-	1.11	27.8
10.-	1.2	29.0
11.-	1.32	31.0
12.-	1.42	33.0
13.-	1.5	34.0
14.-	1.64	36.0
15.-	1.87	39.0
16.-	2.0	40.5
17.-	2.12	40.5
18.-	2.24	43.0
19.-	2.52	45.5

En la figura 5.1 mostramos la gráfica de todos es
tos puntos.

5.2 Obtención de los Parámetros de la Ecuación de Froelich.

Debido a que nos interesa el comportamiento de la máquina alrededor de sus puntos nominales de operación, utilizaremos la forma simplificada de la ecuación de Froelich.
Ecuación 3.1.10

$$E = \frac{a}{b + I_{exc}} \quad W I_{exc} \text{ ----- } 3.1.10$$

Obtención de los parámetros a y b a partir de los siguientes puntos: 8.- y 19.-

	I_c (Amps)	E (volts)
8.-	1.0	25
19.-	2.52	45.5

Necesitamos convertir la velocidad angular en W , - rad a partir de las R.P.M. a las que fué hecha la prueba -- _s que en este caso fué de $N = 1000$ R.P.M. lo cual lo hacemos mediante la siguiente expresión

$$W = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2\pi(1000)}{60} = 104.7 \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

si redondeamos. sería $W \approx 100 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

Ahora si sustituimos los puntos 8 y 19 en la ecuación simplificada de Froelich, llegamos a las siguientes -- ecuaciones.

$$25 = \frac{a (1000) (1.0)}{b + 1.0} \text{ ----- } 5.1.1$$

$$45.5 = \frac{a (100) (2.52)}{b + 2.52} \text{ ----- } 5.1.2$$

si despejamos a de la ecuación 5.1.1 llegamos a:

$$a = \frac{1}{4} (b + 1) \text{ ----- } 5.1.1$$

sustituimos 5.1.1 en la ecuación 5.2 y nos queda:

$$45.5 = \frac{(b+1) (100) (2.52)}{4 (b+2.52)}$$

reagrupando terminos y despejando a b, obtenemos

$$b = \frac{206.64}{70} = 2.952$$

si redondeamos $b \approx 3.0$

Si sustituimos este valor de $b = 3.0$ en la ecuación 5.1 obtenemos el valor de a que nos da:

$$a = 1.0$$

Si sustituimos estos valores en la ecuación 3.1.- junto con el valor de W (rad/s). Obtendremos la ecuación -- simplificada de Froelich, de esta máquina de C.D°, ecuación (5.1.3)

$$E = \frac{100 I_w x c}{3 + I_{ex} c} \text{ ----- } 5.1.3$$

Verificaremos la ecuación de Froelich con la curva de saturación en vacío obtenida en el laboratorio de la-

siguiente manera.

En la ecuación 5.3 tabularemos, con los mismos valores de corriente de excitación para comparar las curvas - A continuación mostraremos la tabla obtenida en el laboratorio y la ecuación de Froelich tabulada.

	I_s (Amps)	E (volts)	(Ec. de Froelich) (volts)
1.-	0	2	0
2.-	0.12	4	3.8
3.-	0.26	7.5	7.97
4.-	0.38	10.0	11.2
5.-	0.54	14.0	15.25
6.-	0.70	18.5	18.9
7.-	0.90	23.0	23.0
8.-	1.0	25.0	25.0
9.-	0.11	27.8	27.0
10.-	1.2	29.0	28.5
11.-	1.32	31.0	30.5
12.-	1.42	33.0	32.12
13.-	1.5	34.0	33.33
14.-	1.64	36.0	35.34
15.-	1.87	39.0	38.39
16.-	2.0	40.5	40.0
17.-	2.12	41.5	41.4

18.-	2.24	43.0	42.7
19.-	2.54	45.5	45.6

Podemos concluir que la función obtenida o sea la ecuación de Froelich es muy aproximada a la curva real.

Si hubieramos obtenido una función muy alejada de la realidad, entonces se hubiera hecho necesario tomar varios pares de puntos de distintas regiones de la curva, hasta lograr una aproximación, lo más cercana a la realidad.

En la figura 5.1 mostramos la curva de saturación en vacío y la ecuación de Froelich ya tabulada.

5.3 Determinación y Análisis de las Curvas de Par (Te) Contra Velocidad (ω).

Dos características muy importantes en los motores de tracción son, el Par de arranque y la velocidad (ω). Debido a que estos dos parámetros nos determinan, la potencia del motor del vehículo, su capacidad de aceleración etc, por lo tanto es muy importante conocer el comportamiento de el Par (Te), con respecto a la velocidad.

Ya habíamos mencionado con anterioridad, que el motor de C.D., con excitación en serie, se tenía que su --- máxima condición de Par se tenía en el arranque, lo cuál es una condición muy satisfactoria para los motores de trac--- ción, pero también vimos que este motor es muy inestable en su regeneración, al trabajar como generador.

A continuación analizaremos, como se comportó este motor de C.D. en excitación independiente, en cuanto a - su Par de arranque (Te) y velocidad (ω).

Primero estableceremos las ecuaciones de Par (Te) y velocidad (ω) con las que obtendremos las curvas de == Par vs. ω .

Obtención de la ecuación de Par (Te)

Sabemos que el Par (Te) está dado por la ecuación
(3.4.5)

$$T_e = \frac{E I_L}{W} \text{ ----- } 3.4.5$$

La F.E.M. (E) sabemos, por la ecuación de Froelich. simplificada que esta dada por la expresión (3.1.10)

$$E = \frac{a}{b + I_{exc}} w I_{exc} \text{ ----- } 3.1.10$$

Si sustituímos la ecuación 3.1.10 en la ecuación-3.4.5 llegamos a la siguiente expresión de Par (Te)

$$T_e = \frac{a}{b + I_{exc}} I_L \text{ ----- } 5.3.1$$

Que es la ecuación que usaremos en la determinación de las curvas de Par (Te) contra velocidad (W)

En seguida obtendremos la expresión de la velocidad (W), con la que trabajaremos.

La ecuación del circuito de armadura sabemos que es:

$$V = E + r_a I_L \text{ ----- } 3.3.1$$

Ahora si en esta ecuación 3.3.1, sustituímos la ecuación 3.1.10

$$E = \frac{a}{b + I_{exc}} w I_{exc} \text{ ----- } 3.1.10$$

llegamos a la siguiente expresión.

$$V = \frac{a}{b + I_{exc}} W I_{exc} + r_a I_L \text{ ----- } 5.3.2$$

Si despejamos la velocidad (W) de la ecuación-5.3.2 tendremos la expresión que estamos buscando 5.3.3

$$W = \frac{(b+I_{exc}) (V - r_a I_L)}{a I_{exc}} \text{ ----- } 5.3.3$$

Con las expresiones 5.3.1 y 5.3.3 podemos trazar las curvas de Par (T_e) contra velocidad (W).

Observando la ecuación 5.3.3 si incrementamos el voltaje V , incrementamos también la velocidad (W). Debido a esta situación trazaremos las curvas de Par vs velocidad a diferentes voltajes.

Los voltajes para las cuales trazaremos las curvas serán para 24 y 36 volts respectivamente.

Para $V = 24$ volts. y una corriente de línea (I_L) de 100 y 10 amps. y para diferentes valores de corriente de excitación (I_{exc}) de, 0.5, 1, 2, 3, 4 y 5 amps., trazaremos las curvas de Par (T_e) y velocidad (W).

Si sustituyémos los valores de las constantes de las ecuaciones 5.4 y 5.6 que son:

$$b = 3.0 \quad \text{y } r_a = 0.19 \Omega$$

$$a = 1.0$$

Tendremos que:

$$T_e = \frac{I_{exc} \cdot I_L}{3 + I_{exc}} \text{ ----- } 5.3.4$$

$$= \frac{(3 + I_{exc}) V - 0.19 I_L}{I_{exc}} \quad \text{--- 5.3.5}$$

Los valores de Par (T_e) y velocidad (ω), ya --
tabulados se muestran a continuación en las tablas de la fi
gura 5.2

$$V = 24 \text{ volts} \quad I_L = 100 \text{ amps.}$$

I_{exc} (amps)	5	4	3	2	1	0.5
T_e (New.m)	62.5	57.1	50	40	25	14.28
ω (rad/s)	8	8.75	10	12.5	20	3.5

$$V = 24 \text{ volts} \quad I_L = 10 \text{ amps.}$$

I_{exc} (amps)	5	4	3	2	1	0.5
T_e (New.m)	6.25	5.71	5.0	4.0	2.5	1.428
ω (rad/s)	35.36	38.7	44.2	55.25	88.4	154.7

Figura 5.3.1

En la figura 5.3 mostramos la gráfica de estos --
valores de Par (T_e) y velocidad (ω),

2.- Para $V = 36$ volts.

Las ecuaciones de Par (T_e) y velocidad (ω), --
son las mismas, que para el caso de $V = 24$ volts., al igual
que las condiciones de corriente de línea (I_L) y corriente-
de excitación (I_{exc}). Por lo tanto en la figura 5.3 moatrare
mos directamente la tabla de valores ya tabulada. (fig. ---
(5.3.2)

$$V = 36 \text{ volts} \quad I_L = 100 \text{ amps} \quad r_a = 0.19$$

I _{exc} (Amps)	5	4	3	2	1	0.5
T _e (New.m)	62.5	57.2	50	40	25	14.3
W (rad/s)	27.2	29.75	34	42.5	68	119

$$V = 36 \text{ volts} \quad I_L = 10 \text{ amps.} \quad r_a = 0.19$$

I _{exc} (amps)	5	4	3	2	1	0.5
T _e (New.m)	6.25	5.72	5.0	4.0	2.5	1.43
W (rad/s)	54.56	59.7	68.2	85.25	136.4	238.7

Figura 5.3.2

La gráfica de estos valores también está representada en la figura 5.3

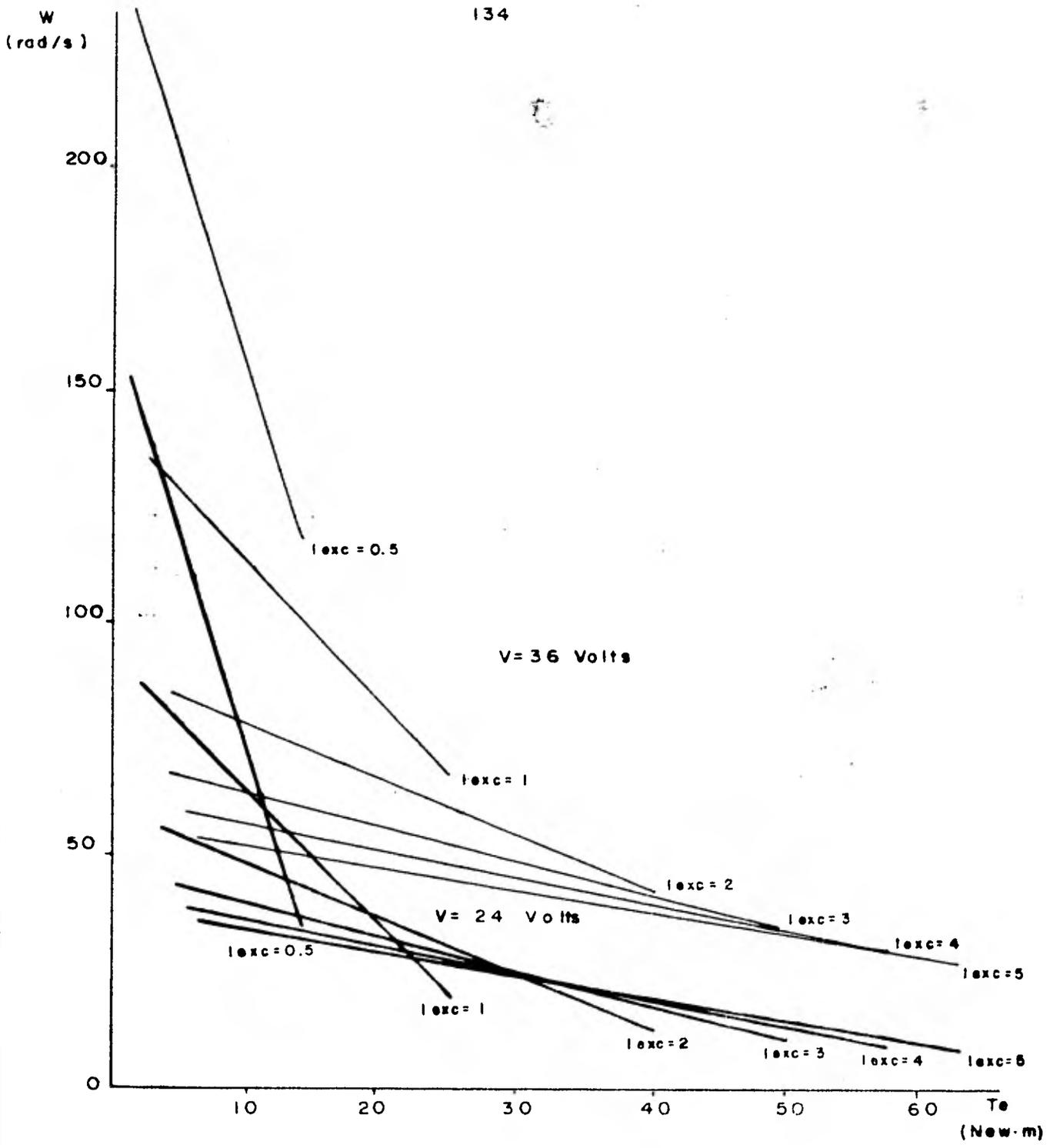


FIG. 5.3.

C O N C L U S I O N E S

De las curvas mostradas en la figura. 5.3, podemos concluir en lo siguiente, Primeramente vemos una situación muy favorable, en cuanto a que el Par máximo se da en el arranque del motor, condición que es muy importante en los sistemas de tracción, en particular en los vehículos, la condición de máximo Par, es necesario en el momento en que empieza a desplazarse el móvil, o sea en el arranque.

Por otra parte si analizamos el comportamiento de Par (Te) contra velocidad (ω), con $V = 24$ volts, vemos que los pasos entre los diferentes valores de corriente de excitación se presenta una continuidad menos uniforme, esta se traducira en el movimiento del vehículo en que la aceleración del vehículo sería más suave a 24 volts y un poco más brusco a 36 volts.

Una condición importante es que con $V = 36$ volts se alcanza una velocidad (ω), mucho mayor que con $V = 24$ volts, condición que también es muy importante puesto que el vehículo tiene que alcanzar una velocidad aceptable, por lo que concluimos en lo siguiente:

Podemos iniciar la marcha con $V = 24$ volts y cuando se haya alcanzado cierta velocidad, hacer el cambio a $V = 36$ volts y poder así alcanzar una velocidad mayor.

Volviendo a la condición de Par vemos que el máximo se da en el arranque y que conforme obtenemos más velocidad el Par disminuye que es la misma condición que se pre--senta en el movimiento de los vehículos, conforme alcanzanmás velocidad, el Par que se necesita suministrar a las ruedas motrices es menor.

5.4 Ejemplo de Aplicación: Para la Obtención de - la Potencia de Motor

En esta parte del capítulo V haremos uso en la -- aplicación de los conceptos establecidos en los capítulos I y II, mediante un ejemplo de comparación. Esta consistirá - en lo siguiente, tomaremos el dato de potencia máxima de un vehículo, existente y sus características técnicas, y con - los criterios desarrollados calcularemos la potencia máxima a partir de estas características, y compararemos el resul-
tado obtenido con el nominal del vehículo.

Los datos técnicos del vehículo que se tomaron -- son los de un vehículo del tipo popular convencional, estos datos son los siguientes:

Medidas y Pesos	mm
Largo	4070 mm
Ancho	1540 mm
Altura	1500 mm

Peso en vacío	
(listo para servicio)	780 Kg.
Carga útil	380 Kg.
Peso total admisible	1160 Kg.

Capacidades

Potencia máxima (nominal)	40 C.V.
Velocidad máxima y de -- crucero	120 Km.h.

Con las dimensiones del automóvil y su velocidad máxima se puede calcular la potencia máxima (N_{vmax}), de acuerdo con la ecuación (2.1.7)

$$N_{max} = \frac{G \cdot (f \cdot \cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha)}{270 \cdot \mathcal{R} \cdot N_o} \cdot V_{max} + \frac{0.0049 \text{ C.F}}{270 \cdot \mathcal{R} \cdot N_o} V_{max}^3 \quad (2.1.7)$$

Los diferentes variables de la ecuación 2.16 los tomaremos de los datos técnicos y los faltantes los calcularemos y los tomaremos de las gráficas enunciadas, en los capítulos I y II.

A continuación pondremos las variables con los valores que toman a partir de los datos proporcionados.

$$G \text{ (peso total)} = 1160 \text{ Kg.}$$

$$V_{max} \text{ (vel. max.)} = 120 \text{ Km./hr.}$$

$$\text{(2\% de pend.)} = (1.145)^2$$

$$\text{(Rel. } N_{Kv}/N_{kmax}) = 0.9$$

El coeficiente frontal del aire (C) lo estimare--

tenemos:

$$N_{vmax} = \frac{(1160) (0.015) (\cos (1.145)^{\circ} + \sin((1.145)^{\circ}))}{(270) (0.9880.906)} \cdot 120 +$$

$$N_{vmax} = 22.16 + 18.56 = 40.72 \text{ C.V.}$$

$$N_{vmax} = 40.72 \text{ C.V.}$$

Si comparamos este valor obtenido, con el nominal expresado vemos que el error es del 1.75% por lo que podemos concluir que la ecuación 2.6 es bastante confiable para el cálculo de la potencia máxima (N_{vmax}) requerida.

Podemos decir entonces que con estas formulas, expresadas en los capítulos I y II podrían servir para predecir el comportamiento del diseño de un vehículo que se pretendiera desarrollar.

C A P I T U L O VI

CONCLUSIONES GENERALES

Con este capítulo concluiremos el estudio desarrollado en los capítulos anteriores, exponiendo las conclusiones a las que se llegó.

En lo que respecta en la primera parte donde se hace el análisis de la mecánica del movimiento del automóvil, expusimos criterios sencillos pero certeros para analizar la acción de las diferentes fuerzas y momentos que actúan en el movimiento de un vehículo, también establecimos un criterio para selección de la potencia necesaria, para que funcione adecuadamente un vehículo.

En los capítulos siguientes, está el comportamiento de las máquinas de C.D., en donde surge una situación -- muy importante. Después de haber analizado el comportamiento, mediante el estudio teórico, y haber realizado pruebas con una máquina de C.D., llegamos a la siguiente conclusión.

El aprovechar la máquina de C.D. tal y como se nos presenta con los diseños ya establecidos, no sería la situación más óptima, sino que visualizamos que sería necesario efectuar un nuevo diseño de la máquina de C.D. para lograr un mejor aprovechamiento de la misma.

El nuevo diseño de la máquina de C.D. sería el siguiente, tendríamos dos armaduras montadas sobre una misma flecha o sea que mecánicamente estarían acoplados en serie como se muestra en la figura 6.1, tanto la armadura (A) como la armadura (A2) girarían en el mismo sentido.

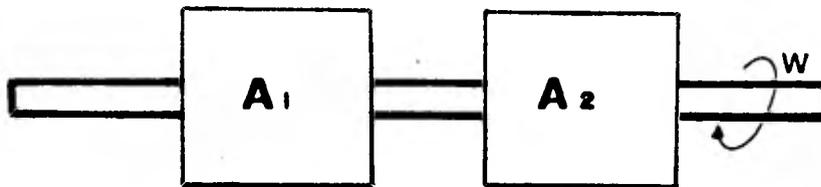
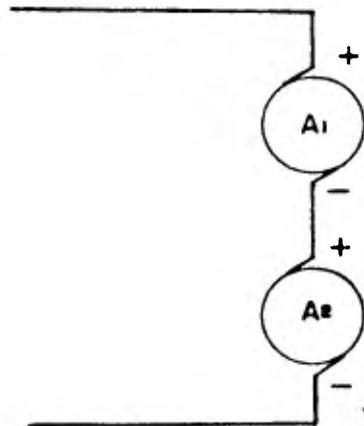


Figura 6.1

En la parte eléctrica, las dos armaduras quedarían conectadas en serie teniendo un solo conmutador, en este nuevo diseño podríamos tener una sola fuente de energía y por lo tanto ya no sería necesario, el cambiar las fuentes de energía en arreglos serie paralelo y viceversa, en la figura 6.2 mostramos la conexión de las armaduras.

FIG. 6.2

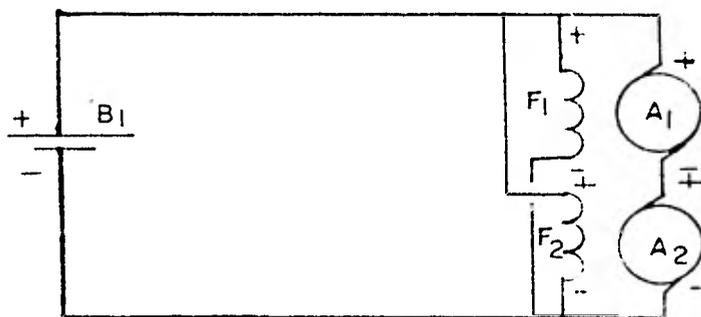


Esto lo hacemos con el fin de tratar de tener el siguiente arreglo. En una de las armaduras controlaremos el Par y en la otra la velocidad angular (ω). Esto lo conseguiremos mediante un enbobinado especial, del cual solo mencionaremos que en una armadura tendremos un cierto número de espiras y en la otra tendremos el doble de espiras que se tenga en la primera.

En cuanto a los devanados de campo, estarán de la siguiente forma, tendremos uno para cada una de las armaduras y estos campos estarán conectados entre sí en paralelo.

Esto sería lo que en un principio visualizamos -- que sería lo más apropiado, dejando abierto el estudio para que se continúe con este. Siendo por lo tanto esta la primera parte de un estudio sobre el sistema de tracción para -- vehículos movidos por máquinas eléctricas de C.D. dejando establecido que este estudio continúa.

En la siguiente figura 6.3 mostramos un diagrama de conexiones con los elementos principales de la nueva máquina de C.D. con su fuente de energía.



F I G . 6 . 3 .

Por lo anteriormente expuesto dejamos abierta --- cualquier aportación que pudiera hacerse, esperando que despierte el interes por la investigación y realización de nuevos estudios de nuestros compañeros de Facultad para lograr así una independencia tecnologica que es esencial para la superación de nuestra escuela y del País.

mos, mediante el gráfico de la figura 4.

$$C = 0.22$$

La superficie de la proyección del vehículo sobre un plano perpendicular a su eje (F), la calcularemos mediante la ecuación 1.3.13

$$F = M.B.H \text{ ----- } 1.3.13$$

$$m = 0.95$$

$$B = 1.54 \text{ m.}$$

$$H = 1.50 \text{ m.}$$

$$F = 2.194 \text{ M}^2.$$

La eficiencia total del sistema de tracción la calcularemos mediante la ecuación (2.5)

$$N_0 = N_6 \cdot N_{5,4} \cdot N_3 \cdot N_2 \text{ ----- } 2.5$$

los diferentes valores de N_6 , $N_{5,4}$, N_3 y N_2 . los tomaremos de la tabla de la figura (2.3)

$$N_6 = 0.92$$

$$N_{5,4} = 0.995$$

$$N_3 = 0.995$$

$$N_2 = 0.995$$

así que: $N_0 = 0.906$

Si sustituimos estos valores en la ecuación 2.6 -

B I B L I O G R A F I A

ING. VICTOR PEREZ AMADOR.

Apuntes sobre temas de investigación, 1980

a) Equilibrio de Máquinas de C.D.

Ed. Div. de Educación Continua Fac. de Ing.

CEZARY SZCZEPANIAK

Teoría del Automóvil, 1973

Ed. C.U.J.A.E.

JEROME MEISEL

Principios de conversión de energía electromecánica, 1977

Ed. Mc. GRAW HILL de México.

S.A. NASSAR AND L.E. UNNEWEHR

Electromechanics and Electric Machines

ALEXANDER S. LANGSDORF

Principios de las máquinas de corriente continua

Ed. Mc. GRAW HILL de México, 1977

LEANDER W. MATSCH

Máquinas Electromagnéticas y Electromecánicas, -

1972.

G.J. THALER AND M.L. WILCOX

Máquinas Eléctricas

Ed. L.I.M.U.S.A., México, 1974

J.V. BYRNE

Compatible controller motor System for battery --
electric vehicle

Ed. I.E.E. 1970. Vol. 117 No. 2

