



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA
DE IMAN PERMANENTE**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :
INGENIERO MECANICO ELECTRICO**

PRESENTA:

JOSE FRANCISCO MANRIQUEZ QUEZADA

DIRECTOR: DR. VICTOR GEREZ GREISER

MEXICO D. F.

1983



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A MI FAMILIA.

N O M E N C L A T U R A .

- ϕ Angulo entre, F y A.
- $\phi = E-U$ Caída de voltaje en las escobillas del motor.
- a, b Coeficientes de fricción.
- K Constante de proporcionalidad.
- T_m Constante de tiempo, en miliseg.
- I_a Corriente de armadura, en amperes.
- I_f Corriente de campo, en amperes.
- I Corriente de línea, en amperes
- B Densidad de flujo magnético, en maxwells/Cm².
- F Fasor que representa al campo de la f.e.m.
- A Fasor que representa a las ondas en el espacio de la f.e.m., de armadura.
- ϕ Flujo magnético ó líneas de flujo en los polos, en maxwells.
- E_c Fuerza contra-electromotriz inducida en la armadura, en volts.
- F Fuerza desarrollada por los conductores del embobinado de la armadura, en newtons.
- l Longitud de los conductores del embobinado de armadura, en Cm.
- P.M. Máquina de imán permanente.
- E.M. Máquina de electroimán.

- J Momento de inercia.
- N Número de conductores.
- 2.a Número de trayectorias en paralelo.
- P Número de polos del campo.
- T Par desarrollado por los conductores en la ar
madura.
- λ_m Par desarrollado por el motor de electroimán.
- λ_r Par resistivo en la flecha del rotor en, nw-m
- \mathcal{E} Voltaje de reacción de armadura en, volts.
- A_d Reacción de armadura desmagnetizante en, volts.
- A_q Reacción de armadura de magnetización cruzada
- R_a Resistencia de armadura en, ohms.
- L Inductancia equivalente en, mili-amperes.
- R Fasor resultante de la proyecciones de F y A.
- a Trayectorias de corriente en la armadura.
- W Velocidad angular en, rev./seg.
- S Velocidad desarrollada en la armadura en, rpm.
- U Voltaje en la armadura en, volts.
- E Voltaje aplicado sin carga, (en vacío) en, volts
- V Voltaje de línea en, volts.

Todas las unidades son referidas al sistema, M. K. S.

I N D I C E .

- 1: -Introducción.

- 2: -Principios de Operación.
 - 2:1-Circuíto Eléctrico de un Motor de C.C.
 - 2:2-Embobinado de Armadura para Máquinas de C.C.
 - 2:3-Circuíto magnético.
 - 2:4-Conexiones de Campo para Máquinas de C.C.
 - 2:5-Curvas Características.

- 3: -Comparación de Modelos Matemáticos para Motores de Electroimán y de imán permanente de C.C.
 - 3:1-Definición y Medición de los Principales Parámetros a voltaje Constante.
 - 3:2-Caída de Voltaje.
 - 3:3-Análisis de la Reacción de Armadura.
 - 3:4-Inductancia de Armadura.
 - 3:5-Parámetros Mecánicos.
 - 3:6-Ecuación General.
 - 3:7-Modelo Líneal a Tramos.
 - 3:8-Función de Transferencia.
 - 3:9-Diagrama de Bode y Simulación Análogica.
 - 3:10-Comparación de los Diferentes Modelos.
 - 3:11-Conclusiones.

4: -Aplicaciones.

**4:1-Desarrollo del Servomotor de C.C., de Imán Permanente de
Cobalto-Samarium.**

4:2-Características Magnéticas.

4:3-Diseño del Motor de C.C.

4:4-Desarrollo del Motor de C.C.

4:5-Aplicaciones.

4:6-Resultados de Pruebas.

5: -Bibliografía.

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

MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DE IMAN PERMANENTE.

El tema de esta tesis, es de los motores de -- corriente continua de imán permanente, se hace una descripción breve y general, resaltando los aspectos más importantes-- de este tipo de máquinas giratoria, que vuelven a ser importantes gracias a su empleo, en sistemas de control y a los avances en el diseño de dispositivos de rectificación, AC/DC. De estado sólido. Debido a las limitaciones de intensidad de campo, impuestas por los imanes permanentes, su tamaño es hasta la fecha menor de 100 H.P., se describen las características generales de las máquinas de corriente continua, empezando -- por el circuito magnético y circuito eléctrico, continuando -- con la forma en que se concatenan, los campos para formar ó -- inducir el par que hace que el rotor gire.

Se confirma detallando sus características de par, velocidad, corriente y potencia, los diferentes tipos de embobinados (imbricado y ondulado), con que se construyen -- las armaduras y formas de acomodo de dichos embobinados, así como las diferentes formas de excitación del campo principal-- (serie, derivación y compuesta), las características, par, -- corriente y velocidad de estas formas de excitación.

Se resaltan las características de los motores que no usan imán permanente, o sea que forman su campo por--- eléctroiman para hacer una serie de comparaciones con motores que tienen campo producido por imán permanente.

Un imán permanente no requiere ser energizado- pero si a perdido mucha intensidad de su campo se puede vol-- ver a magnétizar, energizandolo.

La falta de una excitación permanentees una--- ventaja sobre el motor con embobinado en el campo ya que el-- motor de imán permanente es más eficiente y requiere menos--- mantenimiento, se han desarrollado diferentes aleaciones las- que tienen diferentes características magnéticas muy favora-- bles, y no pierden su campo magnético.

Se describen las ventajas más sobresalientes-- del motor de c.c., de imán permanente en base a sus principa- les características, así como sus aplicaciones, se expone me- todología de diseño para los motores de imán permanente, sepa_ randola en las partes que integran el motor a saber: él dise- ño del circuito magnético no presenta menores complicaciones, es sólo necesario buscar el imán permanente que proporcione-- la densidad del flujo necesario que requiere el diseño.

Se debe escoger de tal manera, el imán para -- que ocupe el volumen adecuado en el interior de la carcasa sin que cause problemas mecánicos, máquinándolo de la forma más-- conveniente. Las formas de diseño, que corresponden al embobinado del circuito eléctrico, en la armadura, son las mismas que para un motor normal, máquina con embobinado en los cam-- pos.

El motor de c.c., de imán permanente, tiene di versos usos que se han ido extendiendo paulatinamente debido a sus ventajas económicas y de manufacturación, y han desplazado a otras máquinas. Así mismo se incluye una descripción de las características magnéticas para aleaciones las cuales son superiores, a las de los elementos que la componen, los-- imanes de cerámica son ampliamente usados en los servomotores (motor de c.c., que mueve servo-mecanismos), este imán propor ciona un producto de energía ($B \times H$), muy elevado. Diferentes ti pos de armaduras, (cilindrica, de disco, etc.), han obligado a desarrollar un el diseño de estos motores a la forma de estas, se citan algunas aplicaciones específicas de estos motores.

Se analizan los diferentes tipos de respuesta de un motor de c.c., de imán permanente y se describen esque-

mas de alambrado, para computadora análogica para la obten --
ción gráfica de dichas respuestas incluyendo la solución del-
problema.

Empleando un programa para computadora digi--
gital, resaltando la utilidad y eficiencia que proporcionan-
estos métodos los que dan respuestas muy rapidas.

2. PRINCIPIOS DE OPERACION.

El motor eléctrico trabaja interaccionando un campo magnético, con un circuito eléctrico el primero es generalmente producido por un electroimán, al pasar corriente por un conductor colocado en un campo magnético se induce en este una fuerza que puede mover al conductor, así como una fuerza-contra-electromotriz (f.e.m.), en el principio anterior se basa la operación de los motores en general, así como de c.c.

2.1 CIRCUITO ELECTRICO DE UN MOTOR DE C.C.

Consiste de una fuerza electromotriz ó fuente-que hace circular corriente por los conductores de la armadura, venciendo la inercia y fricción y la c.f.e.m., inducida--por la interacción entre el campo magnético y el campo inducido en los embobinados de la armadura. La única diferencia entre un generador y un motor, es la dirección de la corriente--en el inducido ó en el inductor, el embobinado de la aramdura contiene un determinado número de bobinas idénticas, coloca--das en ranuras uniformemente distribuídas en la periferie de--el rotor previamente laminado, contruido generalmente con laminaciones de acero de, 0.04 centímetros de espesor.

Las bobinas estan interconectadas a través de un conmutador para mantener unidireccional el sentido del par por lo que es necesario conmutar la corriente.

Este contiene cierto número de delgas (segmentos del conmutador), aisladas entre si el conmutador gira con la armadura, los polos del campo se construyen de sección transverso-rectangular con láminas de acero de 0.06 centímetros de espesor, está construcción de láminas mantiene al minimo las corrientes parásitas, inducidas por las pulsaciones causadas por la diferencia de los valores de la reluctancia del -- circuito magnético, al moverse las secciones de las ranuras - bajo las piezas polares donde los polos del campo estan sujetos al yunque, (yunque, piezas polares, entrehierro y armadura), forman el circuito magnético. El campo magnético es producido por bobinas montadas en las piezas polares, él número de polos de una máquina de c.c., es proporcional al valor nominal del voltaje dado por;

$$E = \frac{2 \cdot P \cdot N \cdot \phi \cdot S}{a \cdot 60}$$

donde:

E=Voltaje aplicado en, volts.

P=N. de polos.

N=N. de bobinas.

ϕ =Flujo magnético en, webers.

S=Velocidad angular en, rad/seg.

a=Número de trayectorias de la corriente en el embobinado de armadura, (paralelas).

A mayor voltaje para un cierto diámetro de la armadura menor será el número de polos en el campo, no así el número de segmentos del conmutador para ese mismo voltaje, ya que también la cantidad de escobillas debe ser igual a la de los polos y el mismo espacio entre escobillas adyacentes debe ser igual al espacio entre polos adyacentes en una proporción las máquinas de corrientes elevadas, requieren un número elevado de polos con el fin de que puedan conducir dicha corriente.

2.2 EMOBINADO DE ARMADURA PARA MAQUINAS DE C.C.

Este embobinado generalmente se construye de cobre colocándose en las ranuras del rotor, conectado a los segmentos del conmutador de número igual al número de bobinas de la armadura en máquinas convencionales. Generalmente hay dos tipos de embobinados para las armaduras de c.c., Imbricado y Ondulado, éstos se pueden arreglar en formas; Simplex ó Múltiplex, los embobinados múltiplex están formados por circuitos simplex conectados en paralelo.

El embobinado imbricado simplex tiene tantas trayectorias de corriente como número de polos, $a=P$, donde; a = N° de trayectorias de corriente, y P =N° de polos.

El embobinado ondulado simplex tiene sólo dos trayectorias de corriente, $a=2$ sin tomar en cuenta el número de polos, se puede combinar un embobinado imbricado con un em bobinado ondulado en una máquina, esta combinación se conoce con el nombre de embobinado cruzado.

La bobina ondulada es la más común respecto a la imbricada y se usa en casi todas las máquinas de c.c., de capacidad igual o menor a 75 h.p., debido a lo económico de este, en máquinas de bajo voltaje y altas corrientes y para una velocidad dada, el número de vueltas en el embobinado de la armadura requiere de un embobinado imbricado en todas las máquinas menos en las de dos polos ya que en estas, $a=2$,. En un embobinado ondulado la sección transversal de los con ductores será mayor de modo que la cantidad de conductor en este embobinado ondulado sea el mismo que para un embobinado imbricado, dado para ambos un valor nominal de potencia.

Es más económico un embobinado de sección tran sversal gruesa y un número menor de vueltas, el espacio requ erido para el aislante que esta entre las vueltas en la bobina na

tambien es menor.

Esto facilita la transferencia de calor lejos de los conductores del embobinado, un embobinado con una sección transversal grande tambien puede presentar dificultades mecánicas. La solución sería un embobinado tipo imbricado con más número de vueltas y sección transversal pequeña en el conductor lo cual es más practico.

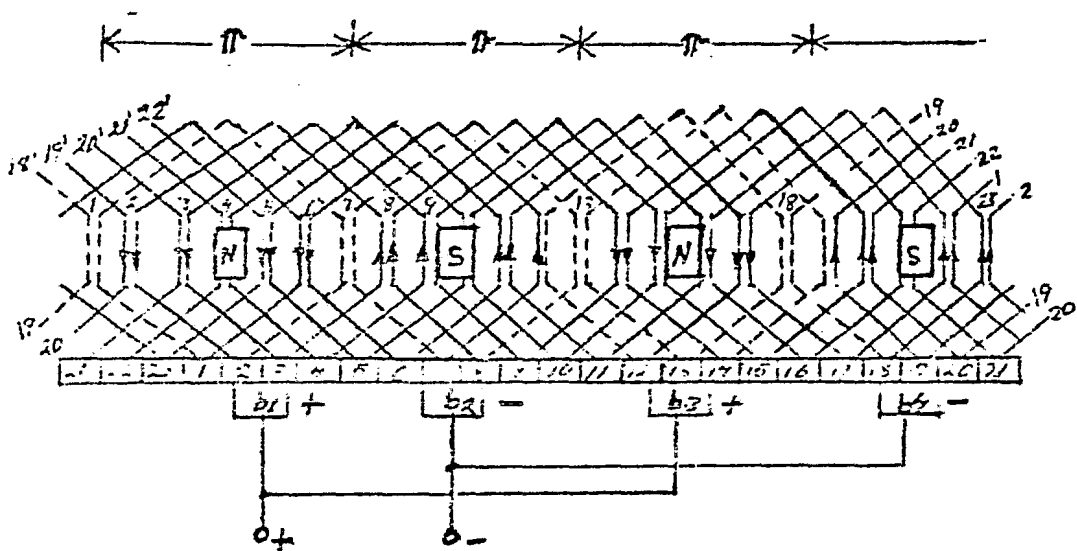


Fig.2.2.1. Desarrollo de un embobinado tipo imbricado, de cuatro polos.

La fig.2.2.1., muestra el desarrollo de un embobinado imbricado que contiene 23 bobinas de una vuelta cada bobina, y 4 escobillas que deslizan respecto al conmutador -- que tambien tiene 23 delgas, el traslape entre las bobinas adyacentes ó imbricadas, que es lo que da el nombre al embobinado.

El embobinado imbricado simplex de 4 polos tiene 4 trayectorias de corriente; $a=4$, por esto requiere de 4 escobillas. Al recorrer el embobinado de una escobilla a otra de polaridad opuesta, un cuarto del embobinado esta torcido, lo cual muestra las 4 trayectorias. habrá tantas trayectorias como polos en el embobinado imbricado.

Una bobina de a madura termina en las delgas--adyacentes del conmutador, la posición del centro de cada polo del campo se indica con, N y S polaridad norte y sur. Si las escobillas son más anchas que un segmento de las delgas--tndran más área de contacto por lo que abarcaran más segmen--tos, evitando el chisporroteo de voltaje. Las bobinas punteadas están en corto circuito por las escobillas, los lados de las bobinas en corto circuito son equidistantes con los polos del campo.

En regiones donde la densidad de flujo es muy baja, la f.e.m. rotacional en las bobinas en corto circuito es pequeña, esto hace que se produzcan corrientes de corto-circuito despreciables.

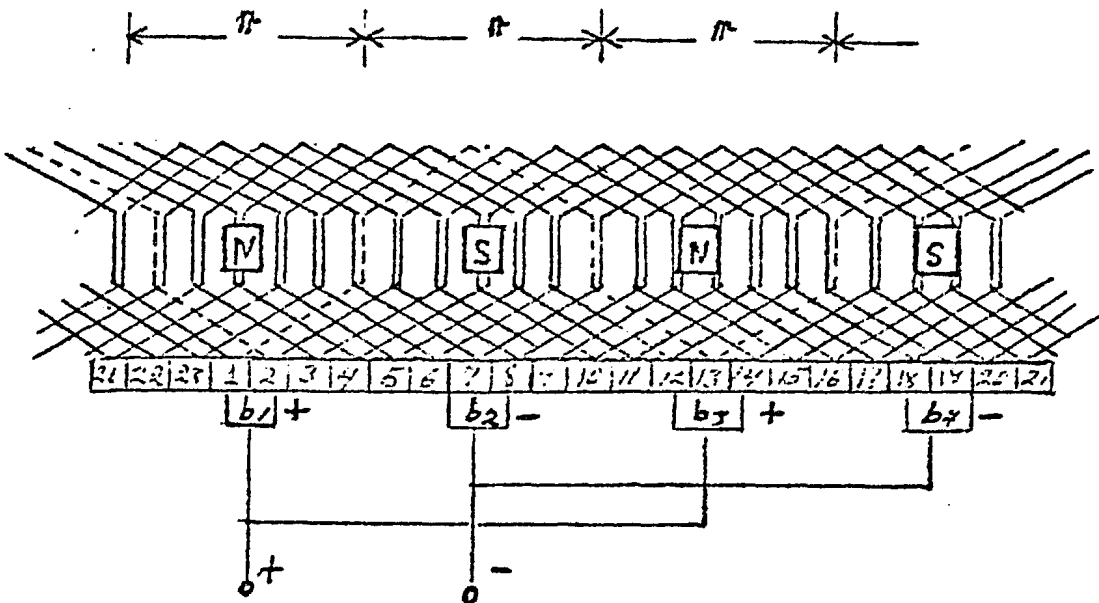


Fig.2.2.2. Desarrollo de un embobinado tipo ondulado, de cuatro polos.

La fig.2.2.2. Muestra un embobinado ondulado de 4 polos y 23 bobinas y mismo número de delgas, con una vuelta por bobina. Las bobinas en corto circuito se muestran con líneas punteadas translapando a las delgas, el nombre de ondulado se debe a la apariencia de una onda a la cual se semeja la bobina de una vuelta.

Al recorrer uno de los embobinados desde una--
escobilla a otra de polaridad opuesta, se encuentra que la mi
tad del embobinado y una mitad de las delgas estan encontra--
das y muestra que sólo hay dos trayectorias para la corriente
en este tipo de embobinado sin tomar en cuenta el número de--
polos, practicamente el embobinado ondulado requiere de sólo--
dos escobillas lo que es suficiente en una máquina pequeña.

Generalmente se usa el mismo número de escobi--
llas que de polos, esto proporciona una cantidad adecuada de--
área de contacto con un conmutador pequeño.

Una bobina de armadura con embobinado ondulado
terminará en una delga casi dos pasos polares adelante de---
donde comienza.

Reacción de armadura , f.e.m. y componentes de
flujo en la máquina de corriente continua que en condiciones--
de carga se presentan debido a la corriente de armadura y di--
rección de esta corriente, que se determina por la posición de
las escobillas como se muestra en la fig.2.2.3. (a) así como--
su diagrama fasorial mostrado en la fig.2.2.3. (b). su direc--
ción es perpendicular a la de los polos produciendo un campo--
resultante desplazado respecto al que se produce en vacío.

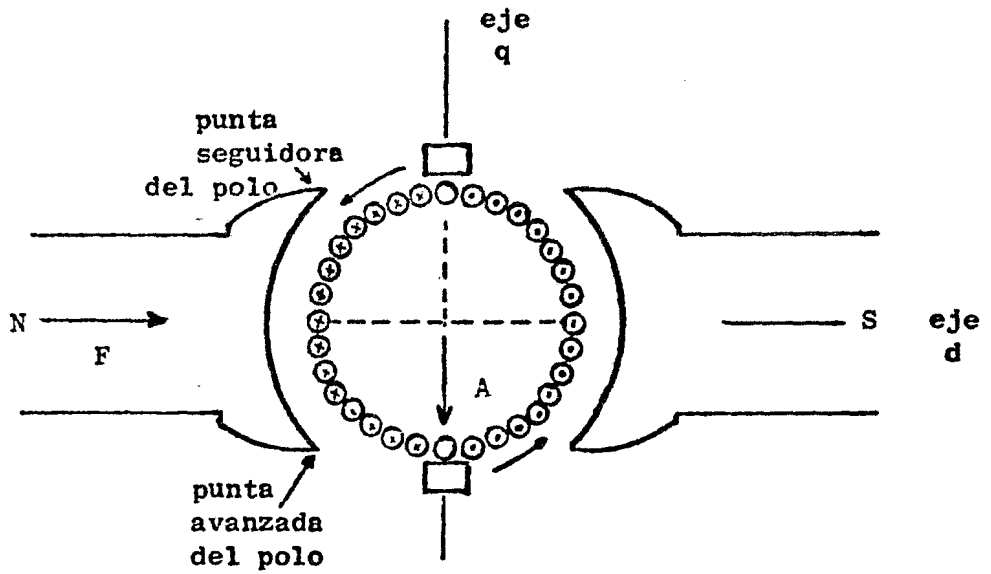


Fig.2.2.3.(a), Motor de dos polos, con las escobillas en el -
neutro geométrico

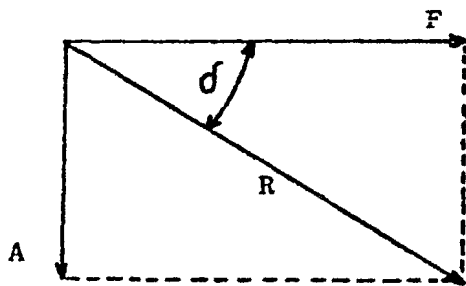


Fig.2.2.3.(b), Diagrama fasorial, de las componentes de la --
g.e.m.

Dupliéndose la zona neutra (densidad de flujo) donde deben estar colocadas las bobinas que conmutan, para--- que las que estan en corto circuito no haya reducción en su--- f.e.m.

La f.e.m. De armadura produce una reacción que tiene un efecto desmagnetizante en el campo.

Se usan dos metodos para contrarrestar estos-- efectos indeseables de la reacción de armadura.

El primero consiste en desplazar las escobi--- llas hacia la zona del neutro eléctrico, es decir en la dirección de rotación para el generador y en contra de la direc--- ción de rotación para el motor.

El segundo metodo consiste en poner polos conmutadores o interpolos, estos son colocados en el eje de cuadratura, con las bobinas conectadas en serie con la armadura--- la f.e.m. De estos es proporcional a la corriente de armadura lo que produce un efecto magnétizante opuesto al de la armadu--- ra.

Se muestra un diagrama simplificado de una máquina de dos polos que muestra el efecto de desplazar las es-

cobillas del neutro geométrico, fijas en el neutro geométrico la f.e.m., total de armadura, esta dirigida a lo largo del eje en cuadratura. La fig.2.2.4.(a), muestra los fasores F y A, que son las componentes del campo y ondas en el espacio respectivamente de la f.e.m., de armadura, los que son producidos por el fasor R de la f.e.m., resultante.

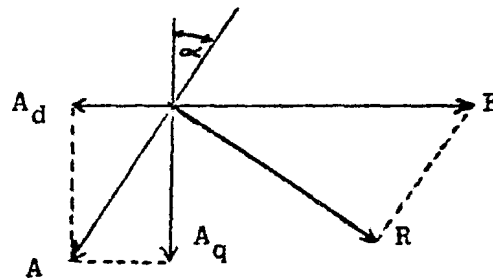


Fig.2.2.4.(a), Fasores de las componentes fundamentales de las ondas de las f.e.m.'s

Operando la máquina como generador la dirección de la f.e.m., resultante se mantiene fija, las escobillas se pueden colocar en el neutro eléctrico avanzándose a través del ángulo δ adelante del neutro geométrico en la dirección de rotación para el generador.

En operación motor, con dirección de corriente de campo y la rotación sin alterarse, la corriente de armadu-

ra estará en la dirección, como se muestra en la fig.2.2.3.,- el fasor R de la f.e.m. De campo dado por el ángulo σ , entonces el neutro eléctrico del motor está desplazado del neutro geométrico en contra de la dirección de rotación, ya que la f.e.m. De armadura se avanza y retraza por el ángulo σ .

Se diría que en ninguna posición en que se pusieran las escobillas podría alcanzarse esto, pero debido a la acumulación del flujo (por decir así) en el último punto del polo del campo de un generador y en el punto de la cabeza del polo para un motor, esto causa que esa región del polo del campo se sature de forma que el desplazamiento posterior de las escobillas no aumenta significativamente el ángulo σ del fasor R resultante más allá del fasor F.

Un desplazamiento de las escobillas desde el neutro geométrico en la máquina de (c.c.) introduce una componente de la fem de armadura en el eje directo fig. 2.2..4 (b)

Los conductores de la armadura incluidos en el rango 2α dan lugar a la reacción de armadura desmagnetizante (Ad) y los conductores de la armadura que caen en el rango $\pi-2\alpha$ producen una reacción de armadura magnetizante cruzada (Aq).

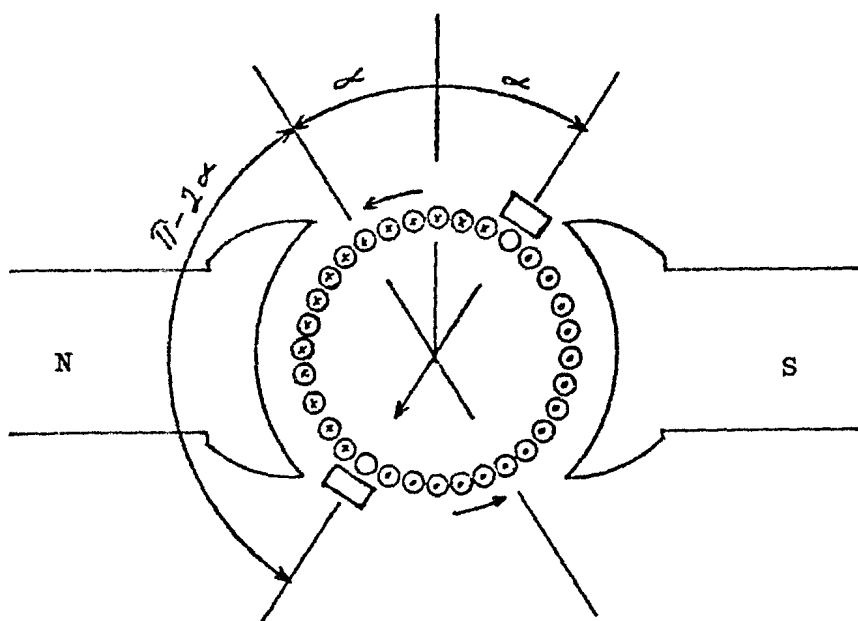


Fig.2.2.4.(b), Diagrama de un motor de dos polos, con las -
 escobillas adelantadas del neutro geométrico.

Los amperes vuelta de la magnetización cruzada causa una distorsión en el campo y si no hubiera una saturación no habría efecto de magnetización ó desmagnetización.

Los diagramas de fasores son validos para máquinas de dos polos. se aplican a máquinas multipolares si el ángulo mecánico se convierte en ángulo eléctrico por el factor $P/2 \propto$ donde P es el número de polos.

Un cierto valor de desplazamiento de las-

escobillas en una dirección es idealmente correcta para una-- razón particular solamente de la corriente de armadura respecto a la corriente de campo, cuando las variaciones de la saturación magnética se desprecian.

El diseño de máquinas de c.c., sin polos conmutantes, es tal que una conmutación satisfactoria se obtiene a velocidad y voltaje nominal sobre el rango normal de carga.,- es evidente que una inversión en la rotación cuando opera como motor ó generador, tiene como consecuencia una inversión - en el desplazamiento de las escobillas, y para una dirección-dada ,en de rotación, al pasarse operación motor a generador-- ó viceversa, se requiere que las escobillas se desplacen del-neutro geométrico en la dirección opuesta, esta limitación no se presenta en máquinas con polos conmutadores.

2.3 CIRCUITO MAGNETICO.

El motor desarrolla un par, y por medio de él- tiende a girar la armadura de éste. Este par lo integran fuerzas inducidas y equidistantes, paralelas y opuestas. La máquina de c.c., presenta tres características a saber;

I. Una corriente circulando a través de los conductores de la

armadura (circuito eléctrico).

2. Presencia de líneas de fuerza magnética producidas por el campo principal (circuito magnético).

3. Fuerza o par producido por la interacción de los dos puntos anteriores.

Los fasores que representan a cada uno de los tres puntos anteriores son perpendiculares entre sí.

Veamos primero si una corriente se orienta en un campo magnético no uniforme la densidad de flujo será mayor en un lado del conductor que en el otro, este conductor experimentará una fuerza en el lado donde no hay concentración de campo magnético como se muestra en la fig.2.3.1.(a)

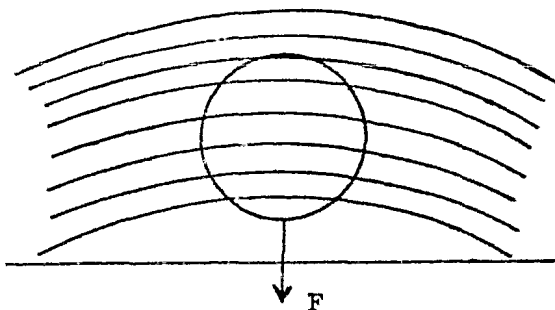


Fig.2.3.1.(a), Conductor. fluyendo la corriente hacia dentro y sometido a un campo magnético no uniforme.

Si el conductor no porta corriente y se coloca en un campo magnético uniforme no sucederá nada, como muestra Fig.2.3.1.(b)

la fig.2.3.1. (b).

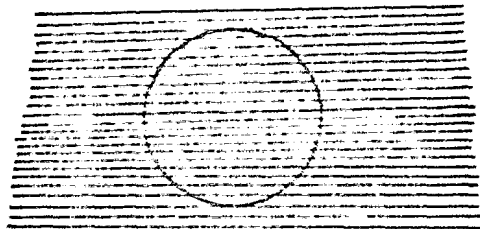


Fig.2.3.1.(b), Conductor sin corriente, en un campo magnético uniforme.

Un par de conductores cituados diamétralmente en ranuras sobre la cabeza de la armadura de una máquina de dos polos, si se energiza el campo la distribución del flujo es completamente uniforme y simétrico. fig.2.3.2.

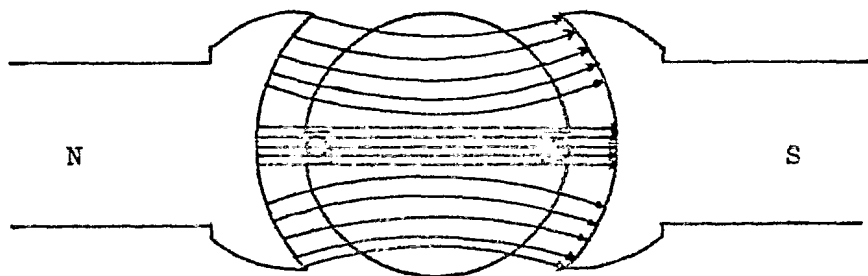


Fig.2.3.2. Campo magnético producido por polos electromagnéticos.

Si los conductores de corriente porta una cierta cantidad de corriente este fluirá en torno a ellos un-

campo magnético circular, como se muestra en la fig.2.3.3., - cuya dirección se rige por la regla de la mano derecha ó ley del sacacorchos, la cual nos dice; La dirección del campo magnético inducido será de trayectoria circular y concentrica al eje del conductor, y esta en un plano perpendicular a dicho eje, si se invierte el sentido de la corriente se invertira - tambien la dirección del campo magnetico inducido, esto demuestra que la dirección del flujo magnético depende de la dirección de la corriente.

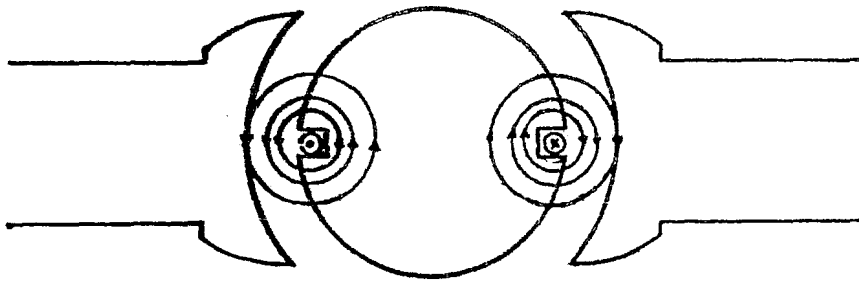


Fig.2.3.3. Campo magnético inducido en conductores. que portan corriente.

La relación entre la dirección de un campo magnético y la dirección de una corriente que circula por un conductor, expuesto a dicho campo magnético si no hay otro campo en la proximidad del conductor, hay dos reglas que rigen esta relación entre corriente del conductor y el campo producido al pasar la corriente por el conductor.

Ponemos el conductor en la mano derecha, que - el dedo pulgar señale la dirección de la corriente, y los dedos restantes señalaran la la dirección de las líneas de flujo inducido. La otra regla nos dice, la dirección de la corriente y del campo magnético inducido están en igual relación - que la dirección de un sacacorchos en el giro de este.

Cuando se excita el campo y la corriente fluye en los conductores de los embobinados (en los dos polos del campo), habrá un campo resultante debido a la concatenación de los dos campos, la distribución del flujo resultante alejado pero en la región de los conductores, es uniforme. La densidad de flujo es mayor bajo el conductor izquierdo (polo norte), y sobre el conductor derecho (polo sur), será menor encima del conductor izquierdo y bajo el conductor derecho como - la fig.2.3.4.

Montando la armadura, en una flecha con movimiento libre se producirá una rotación de la armadura debida al par resultante, la rotación será en el sentido de las manecillas del reloj en operación generador e inverso para operación motor.

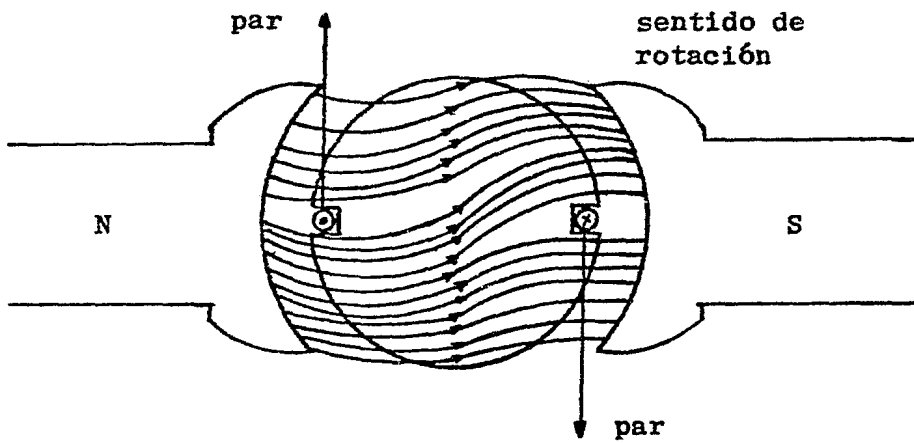


Fig.2.3.4. Que muestra la concatenación del campo principal - con el campo inducido en los conductores, así como la fuerza ó par resultante en los conductores.

La dirección del campo principal, la corriente en los conductores y la fuerza sobre los conductores son mutuamente perpendiculares.

Si la dirección de la corriente en los conductores es contraria, esto es que el conductor izquierdo portaría corriente hacia adentro de frente hacia el observador y el conductor la portará hacia afuera, la armadura tiende a girar en sentido contrario a las manecillas del reloj (operación motor).

Si la polaridad del campo es contraria o se invertir el polo norte por el polo sur, también tenderá la armadura a girar en sentido contrario al reloj.

Entonces la dirección de rotación de la armadura de un motor de c.c. Está sujeta a la trayectoria de la corriente a través de los conductores y la polaridad del campo principal.

Un motor no invertirá su sentido de rotación si la polaridad del campo y la dirección de corriente en la armadura si se cambiaran las dos al mismo tiempo.

2.4 CONEXIONES DEL CAMPO EN MAQUINAS DE C.C.

Las máquinas de c.c. son excitadas con c.d. en los embobinados de campo y se clasifican por la forma de excitación en:

- a) excitación en derivación ó shunt.
- b) excitación en serie.
- c) excitación compuesta, shunt-compound.

Esta clasificación se hace debido a la conexión del circuito del campo, relativo al circuito de armadura.

Las fig.2.4.1. (a) y (b) muestran diagramas---esquemáticos de conexiones para las diferentes clasificaciones.

Una resistencia ajustable conocida como reostato de campo con la que se ajusta la corriente que circula---por el campo. Se coloca en serie con el campo derivación, la máquina en derivación tiene su circuito de campo conectado en paralelo o en derivación con el de la armadura, puede ser de excitación propia o separada.

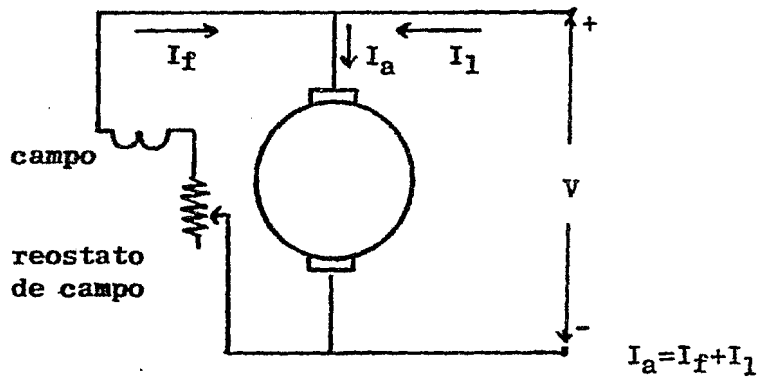


Fig.2.4.1.(a), Conexión en derivación para un motor, con excitación propia

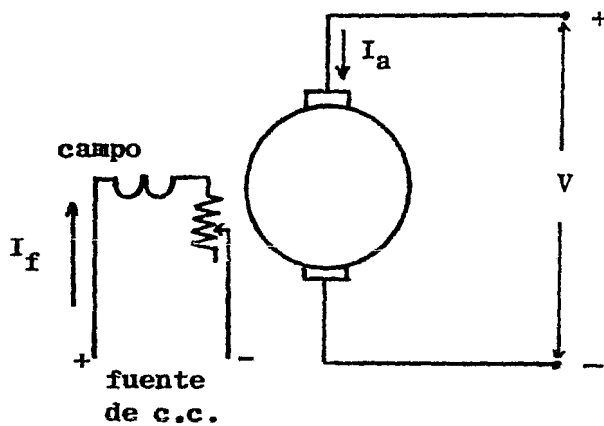


Fig.4.2.1.(b), Conexión en derivación para un motor, con excitación independiente.

El embobinado de campo para la máquina con---
excitación serie, está en serie con el embobinado de la arma-
dura mientras que en la máquina compuesta lleva un embobinado
de campo en derivación y un embobinado de campo serie, ambos--
en el mismo polo como muestran las fig.2.4.2.,2.4.3., el mo--
tor compuesto se puede conectar en derivación larga ó en deri-
vación corta, que incluye embobinados de polos conmutadores--
fig.2.4.4.

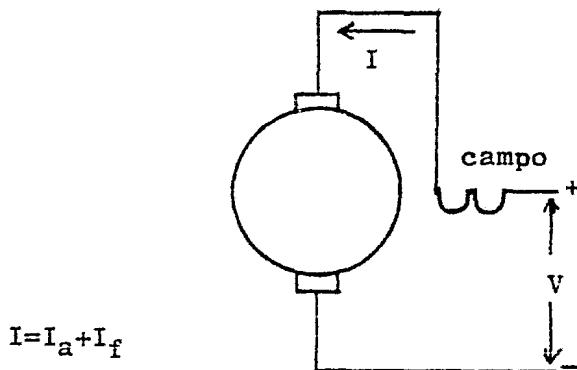


Fig.2.4.2. Conexión en serie para un motor, excitación serie

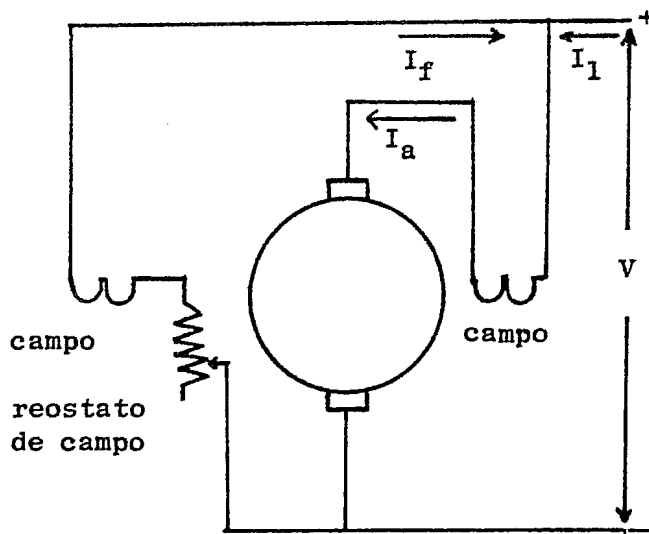


Fig.2.4.3. Conexión compuesta para un motor, con excitación-
propia

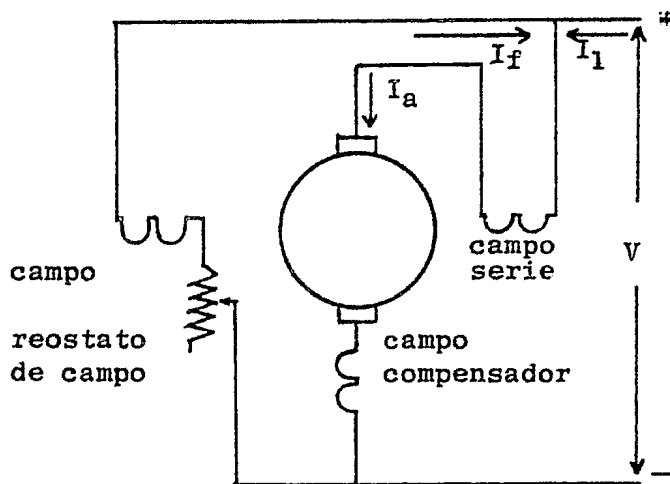


Fig.2.4.4. Conexión compuesta para un motor, con campos de los polos compensadores, y campo serie.

2.5 CURVAS CARACTERISTICAS.

Fuerza y par desarrollado por el motor de c.c. la acción de una fuerza ejercida sobre el conductor por el cu al circula una corriente, y que se encuentra situado en un--- campo magnético depende principalmente de:

1. la densidad en el campo principal.
2. la densidad de corriente a través del con-- ductor.

Se puede demostrar experimentalmente que un conductor de un metro de longitud que porta un ampére de corriente ejercerá sobre él una fuerza de un newton teniendo el conductor una sección transversal de un centímetro cuadrado. Este produce líneas de fuerza magnéticas donde la densidad de flujo es igual a una línea por centímetro cuadrado de modo que se puede escribir una ecuación para la fuerza:

$$F = B \times I \times L \text{ dada en newtons.}$$

Donde;

F= fuerza desarrollada sobre el conductor.

B= densidad de flujo en el campo principal.

I= corriente en el embobinado de armadura.

L= longitud del conductor del embobinado de armadura.

El par es independiente de la velocidad de rotación y lo podemos expresar por la ecuación:

$$T = K \times \phi \times I_a \text{ dada en Kg-Mt.}$$

Donde;

T= par desarrollado en, Kg-Mt.

ϕ = flujo por polo en, Maxwell.

I_a = corriente de armadura en, ampéres.

K= constante de proporcionalidad.

La corriente de armadura a través del campo se rie, varia al variar la carga a cambios bruscos de carga----- habrá cambios bruscos en el flujo de la corriente de la armadura.

El par de un motor en derivación depende sólo de de la corriente. Asumiendo que la corriente del campo en derivación no cambia por el ajuste del reóstato de campo, como muestra la fig.2.5.1.

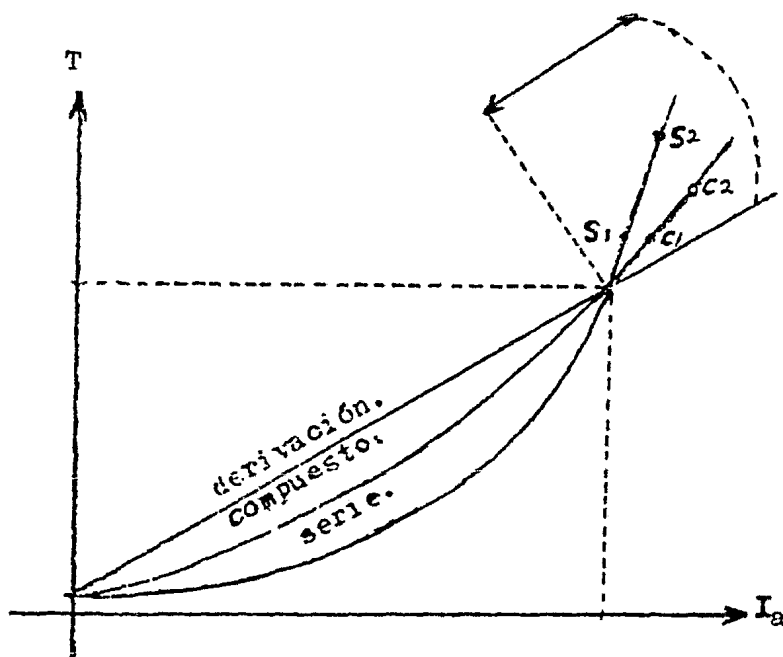


Fig.2.5.1. Curvas de valor del par, para los tres tipos de -- excitación.

Para propósitos de comparación, las curvas se prolongan para los tres tipos de motor con el mismo par a plena carga para un mismo valor de corriente de armadura.

El motor derivación desarrolla el par mayor, a su vez el motor serie desarrolla el par menor, el par desarrollado por el motor compuesto esta en medio de los dos anteriores.

Cargando sobre el rango de la corriente de armadura se observa la diferencia entre el motor serie y el compuesto derivativo tienen curvas lineales, esto es rectas entre S_1 y S_2 , y entre C_1 y C_2 , esta característica significa que el par de sobrecarga de un motor serie es considerablemente alto en comparación al que desarrolla un motor derivación, la recta del motor compuesto derivativo esta en medio de los dos anteriores.

En la práctica es generalmente conocido que el motor serie tiene la capacidad de desarrollar en tales condiciones, par de valores altos. El par desarrollado por un motor al iniciarse su operación se la llama par de arranque.

Algunas aplicaciones de este tipo de motor son en; Trituradoras, Bombas Centrifugas y Ventiladores.

En cualquier tipo de motor se requiere de un par necesario y suficiente para vencer las fuerzas de rozamiento; fricciones principalmente en los cojinetes y escobillas para que inicie su operación, así mismo deberá de tener cargas pequeñas.

Usualmente se asigna un par de arranque de un cierto porcentaje respecto al par total a plena carga, de esta forma un motor puede tener una carga de 500% de su par de arranque.

En promedio un motor compuesto tiene cargas de 250% del par de arranque y un derivación de 125% de su par de arranque, en los casos anteriores el porcentaje de par tiende a normalizar a la velocidad para poder manejar cargas normales a su plena capacidad.

Hablando previamente de la velocidad de salida para los tres tipos de excitación de este motor;

1. la velocidad de un motor derivación se eleva de 2% a 8% -- cuando se remueve completamente la carga.
2. la velocidad de un motor compuesto derivativo se eleva --- aproximadamente de 10% a 25% al remover completamente la carga.

3. la velocidad de un motor serie, se eleva muy rapido cuando se remueve la carga, por esto se debe manejar siempre por una carga ya que sin carga el motor se encarrera peligrosamente - tendiendo a desbocarse.

De la ecuación, $I_a = (V_a - K\phi S) / R_a$, despejamos a la velocidad, $S = (V_a - I_a R_a) / (K\phi)$, asumiendo que V_a , tiene un valor cercano al de E, voltaje de placa del motor el cual es -- constante, sólo un factor afecta cuando la sobre carga en un motor derivación cambia la I_a , donde el cambio máximo en el producto de $I_a R_a$, entre plena carga y sin carga, es del 2% al 5% de V_a , teniendo que el máximo cambio en la velocidad deber ser igual en magnitud respecto de $I_a R_a$.

En los motores derivación los terminos, K, V_a , R_a y ϕ , son casi constantes la única variable es I_a , cuando la carga del motor aumenta la I_a , crece por lo que el númerodor de la ecuación de la velocidad, decrece así mismo al aumentar la carga la velocidad disminuye, se considera que la velocidad es constante en los motores derivación aun cuando esta disminuye minimamente al aumentar la carga, esto es consecuencia de la reacción de la armadura.

El flujo ϕ , decrece tambien al aumentar la car

ga esto hace que la velocidad no disminuya tanto, la mantiene casi constante, la reacción del inducido debe ser lo suficientemente grande para que la curva de la velocidad sea ascendente al aumentar la carga.

En los motores de c.c. La velocidad es casi constante, como el motor derivación la variación de la velocidad que se produce cuando funciona con carga y en vacío (sin carga), esto da una base para aplicar un criterio y poder definir sus características de funcionamiento.

En las normas americanas (C-50 american standards), definen específicamente el cambio de la velocidad nominal (regulación) en el cual el flujo no cambia apreciablemente por lo tanto la velocidad es directamente proporcional a la cantidad de la f.e.m.

$$E_c = V_a - I_a R_a$$

Cuando en un motor compuesto derivativo se le remueve la carga se afectaran dos factores la corriente de armadura I_a y el flujo ϕ .

En contraste con el motor derivación en el que el resto del flujo es casi constante para todas las condiciones de carga.

Cuando en motor compuesto en derivación cae el flujo total debido al efecto del campo serie a esto se debe-- que la velocidad de este motor varíe más entre plena carga--- que la velocidad de un motor derivación, un motor serie debe- ser operado cuidadosamente no permitir que la carga decrezca.

En general se observan los siguientes puntos;-

1. la velocidad de todo motor es inversamente proporcional al flujo de sus polos, $S = (V_a - I_a R_a) / K\phi$
2. El flujo producido en cierto motor serie depende enteramen- te de la corriente de sobrecarga.
3. cuando la carga es densa la corriente es proporcional-men- te extensa y en consecuencia el flujo es alto, por lo que la- velocidad es baja.
4. cuando la carga se disminuye (sin remover por completo),-- la corriente disminuye y consecuentemente se reduce el flujo- incrementando la velocidad.

La caída del voltaje en el circuito de armadu- ra se debe a su resistencia de armadura y a la resistencia de campo serie, lo que afecta a la velocidad en la misma forma,- pero no en la misma proporción. De forma que cuando la carga- es densa la $I_a (R_a + R_{sa})$ es relativamente grande y causa dis- minución en la velocidad.

Cuando la carga es ligera, $I_a (R_a + R_{sa})$, es--
reducido esto hace que se incremente la velocidad.

El cambio en la velocidad es sumamente largo--
en el motor serie con variaciones de carga, por lo que una re-
ducción en esta causará el incremento en la velocidad la no--
saturación esta acompañada del aligeramiento de la carga.

En órden de importancia la característica velo-
cidad-carga de los tres tipos de motores son curvas típicas--
y se muestran en las graficas de las fig.2.5.2. y 2.5.3.

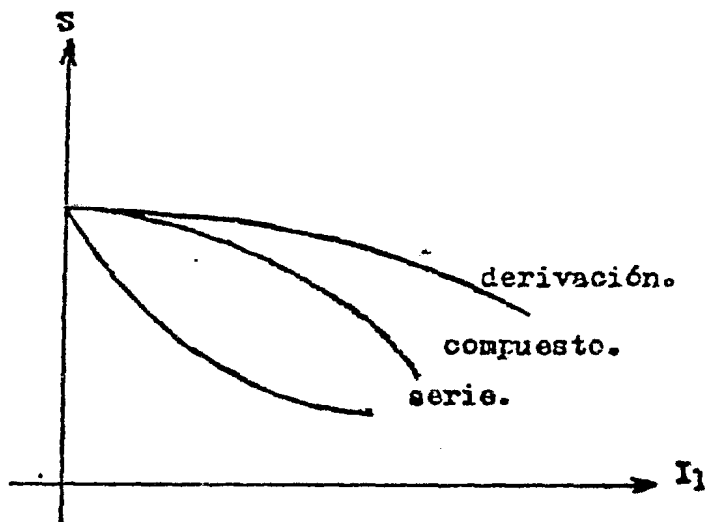


Fig.2.5.2. Curvas características de, Velocidad-Corriente.

Para los propósitos de comparación los tres mo-

ores se colocan a velocidades iguales, entregando la misma--
 potencia cada uno de los motores, (% de velocidad, contra % de
 plena carga, es igual a la ganancia de potencia en H.P.).

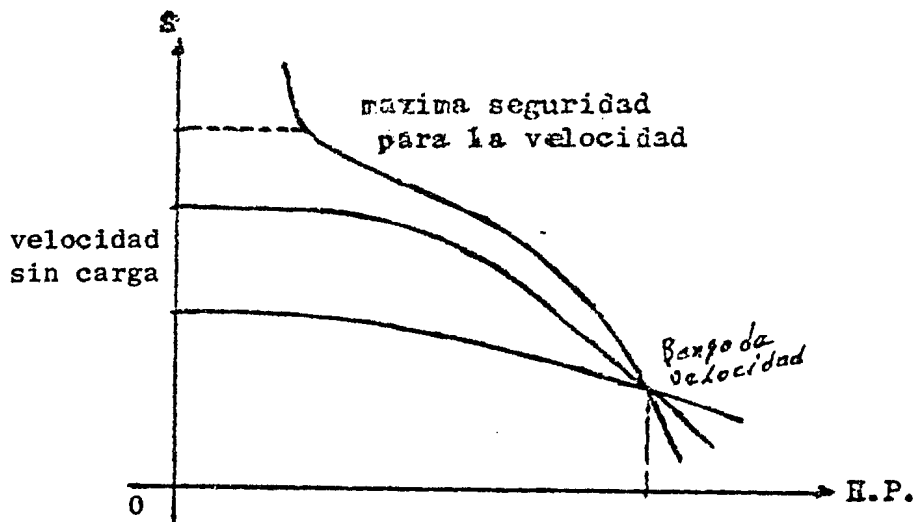


Fig.2.5.3. Curvas características, de carga ó de potencia de salida.

De las curvas se puede observar que:

1. la velocidad de un motor derivación es casi constante y ti
ene el mismo valor sin carga.
2. la velocidad de un motor compuesto varia considerablemente
y tiene un valor definido sin carga.
3. el motor serie opera sobre un rango de velocidad muy am--
plio, se debe cuidar que no se aleje de el.

El motor serie nunca es usado en una zona ó--- rango, en que la carga sea tal que el par caiga a un 15% del par a plena carga.

3. COMPARACION DE MODELOS MATEMATICOS PARA MOTORES DE IMAN PERMANENTE Y DE ELECTROIMAN DE C.C.

Los motores de c.c. Son usados en diversos tipos de trabajos y sistemas industriales por sus características de par, generalmente se usan los motores con una sobreamplificación líneal dandoce la necesidad de diseñar modelos de sistemas más precisos.

Estas condiciones son convenientes cuando se procede a hacer otro tipo de estudios. En nuestro caso se propone desarrollar un modelo líneal para ambas máquinas la de imán permanente y la de electroíman (electromagnético).

La línealidad a tramos y el modelo de la función de transferencia para estas máquinas seran desarrolladas

de un cierto modelo de motor, la respuesta de un modelo será-- por lo tanto comparada con las obtenidas experimentalmete pa-- ra tal caso, se uso un motor electromagnético controlado por-- aramdura, tipo ASEA-I con especificaciones de, 220 volts de -- entrada, 6.3 amperes de corriente, 2050 rpm de valocidad y -- 1 Kw de potencia (excitación separada), y un motor de imán -- permanente con especificaciones de, 90 volts de entrada, co-- rriente de 9.5 amperes, velocidad de 650 rpm y 0.736 Kw de po-- tencia (excitación con imán permanente), escogidos para los - propositos experimentales.

3.1 VOLTAJE CONSTANTE.

El promedio del voltaje inducido entre las ter minales de salida de un generador de c.c., es;

$$E = (2 \cdot N \cdot \phi \cdot 2 \cdot P_n) / (4 \cdot a) \quad \text{I}$$

sí la velocidad se expresa en rad/seg., el promedio de la --- f.e.m., estara dado por;

$$E = ((P \cdot N_c \cdot \phi) / (2 \cdot \pi \cdot \omega)) \cdot W \quad \text{II}$$

sí designamos a, A como una constante particular de la máquina obtenemos;

$$E = A \cdot \phi \cdot W \quad \text{III}$$

donde, $A = (P \cdot N_c) / (2 \cdot \pi \cdot \omega)$.

Sí el flujo Φ se mantiene constante entonces;

$$E = K.W \quad \text{IV}$$

Donde, $K = \Phi.A$, la ecuación IV es un voltaje constante para una excitación dada.

Ambas máquinas en prueba, como si fueran generadores con una excitación constante (máquinas previstas sin carga), la característica, E/W y del voltaje constante se obtiene el valor de K para ambas máquinas:

Máquina E.M., $K = 1.02$ volt (rad/seg) a excitación normal.

Máquina P.M., $K = 1.13$ volt (rad/seg).

3.2 CAIDA DE VOLTAJE.

La caída de voltaje, con carga y rotación normal son condiciones para mediciones dinámicas, la diferencia de tensión es un me todo exacto con un error del 1% en la medición dinámica de los parametros de las máquinas descritas

La caída de voltaje en las escobillas de la máquina E.M. Se puede determinar por medio de la desmagnétización de los polos.

La máquina P.M. como generador proporciona un voltaje $V_G(I)$ que satisface la ecuación:

$$V(I) = E(i) - R \cdot I - \xi(I, i) \quad V$$

para cargas variables, a velocidades fijas y excitación fija del campo, se puede hacer el trazo de la curva $\xi_c(I)$.

La máquina funcionando como motor a la misma velocidad y excitación como el caso del generador, el voltaje aplicado se puede escribir como:

$$U_m(I) = E(i) + R \cdot I + \xi(I, i) \quad VI$$

y se puede trazar la curva de la caída del voltaje (I) podemos suponer que el resto de la caída de voltaje es el mismo en ambos casos pero es conveniente asegurar que las escobillas están alineadas en condiciones satisfactorias, antes del experimento.

Las siguientes dos expresiones para la reacción de armadura y caída de voltaje, obtenidas de las ecuaciones, V y VI.

$$\xi(I) = \frac{\delta_s + \delta_m}{2} \quad \text{y} \quad R \cdot I = \frac{\delta_s - \delta_m}{2}$$

El resultado del experimento se muestra en la fig.3.2.1.

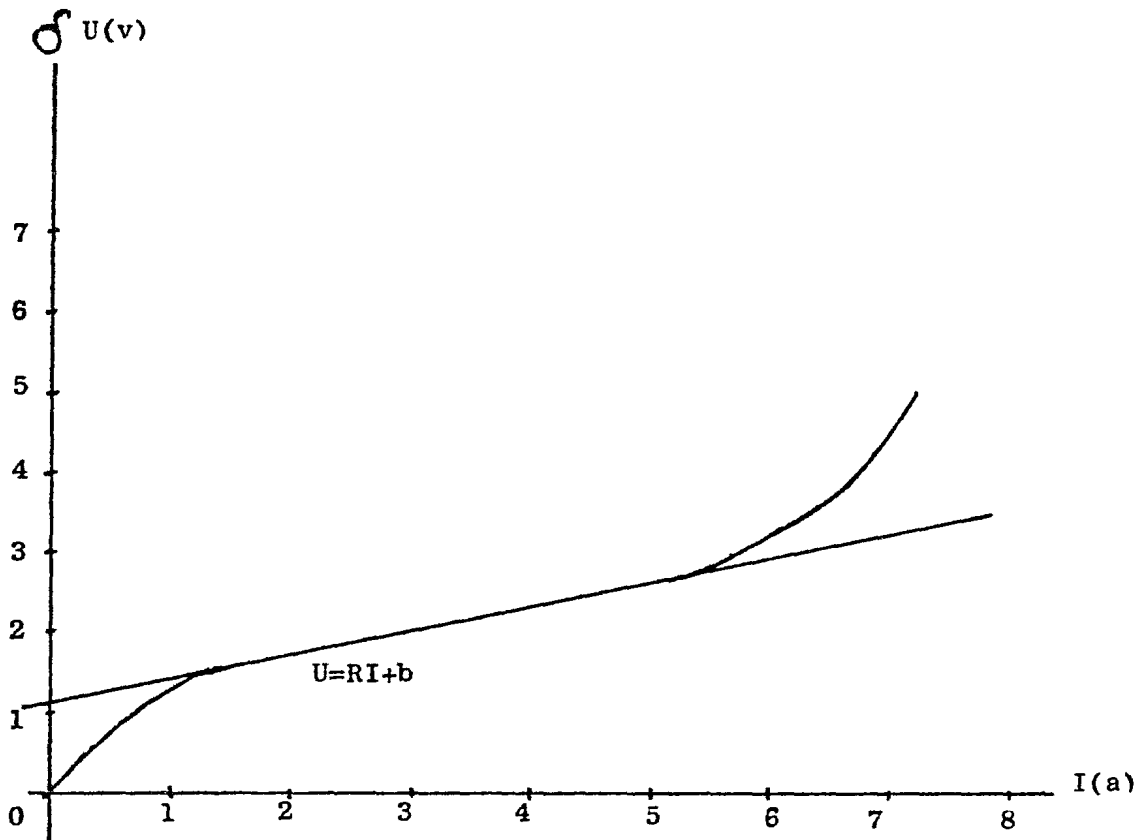


Fig.3.2.1. Curva que muestra la determinación de la caída de voltaje en las escobillas, (máquina no saturada).

$\Delta U(t)$ con $I=0$ y la máquina estando fuera de toda saturación, entonces la parte inferior de la curva se puede asumir que $\xi(I)$ es muy pequeño por lo que la curva es --- prácticamente; $R \cdot I + b$ que corresponde a una línea recta por lo tanto es constante la caída de voltaje en las escobillas;

$$\Delta U(t) = R \cdot I + b \left(1 - e^{-\frac{aI}{b}}\right).$$

La curva $R(I).I$ de la fig.3.2.1., es compatible a una función matemática, obteniéndose los siguientes resultados para cada una de las máquinas:

Máquina E.M.	$R.I=0.43I+1.32(1-e^{-1.27I})$	VIII
Máquina P.M.	$R.I=1.2I+0.68(1-e^{-0.277I})$	IX

La fig.3.3.4., nos muestra que la reacción de armadura depende enteramente de la corriente de la armadura y de la excitación del campo. Suponemos que la reactancia de armadura es la misma para ambos modos; generador y motor.

Sí el eje neutro esta alineado con el eje de las escobillas sólo el efecto de la corriente de armadura, se analizará desde una supuesta excitación de campo constante.

3.3. ANALISIS DE LA REACCION DE ARMADURA.

Una máquina de c.c. Bipolar es considerada en el siguiente análisis teórico de la reacción de armadura.

Simplificando el orden de la discusión, se muestra en la fig.3.3.1. Como se induce en los polos la excitación del flujo ϕ sobre el eje directo y se define el eje neutro como en cuadratura.

Como en el eje directo la corriente de armadura induce un flujo ϕ_d principal y en cuadratura y en cuadratura sobre ϕ , esto sí no ocurre saturación por lo tanto el eje de las escobillas estara sobre la línea neutral por lo que no habrá efecto de desmagnetización.

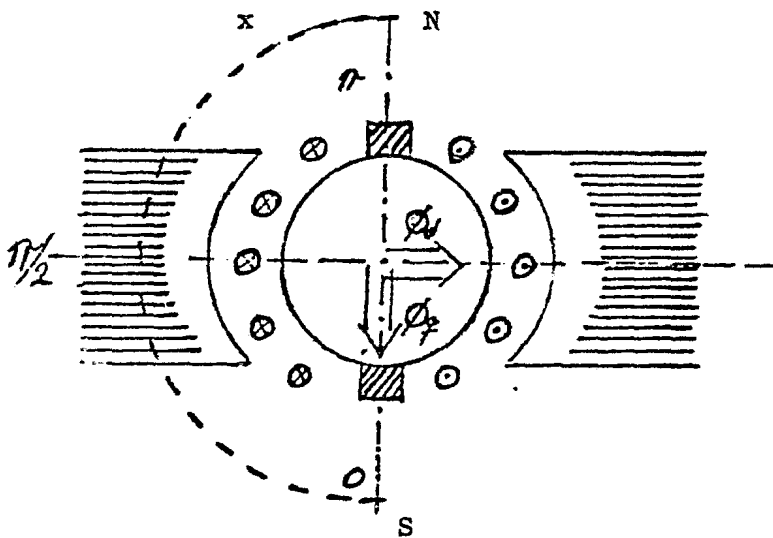


Fig.3.3.1. Diagrama mostrando la distribución del flujo principal.

debido a la reacción de armadura y por la simetría de la máquina.

En la fig.3.3.2., la variación de la densidad de flujo en X (ángulo eléctrico de la máquina), mostrando se en condiciones sin carga. La densidad de flujo operando es B_a ya que la saturación no ocurre en el último punto, la saturación

ración se presenta en el punto principal, la curva B no es --
 simétrica con respecto a, $X = \pi/2$ y el área bajo B, es menor --
 que bajo B .

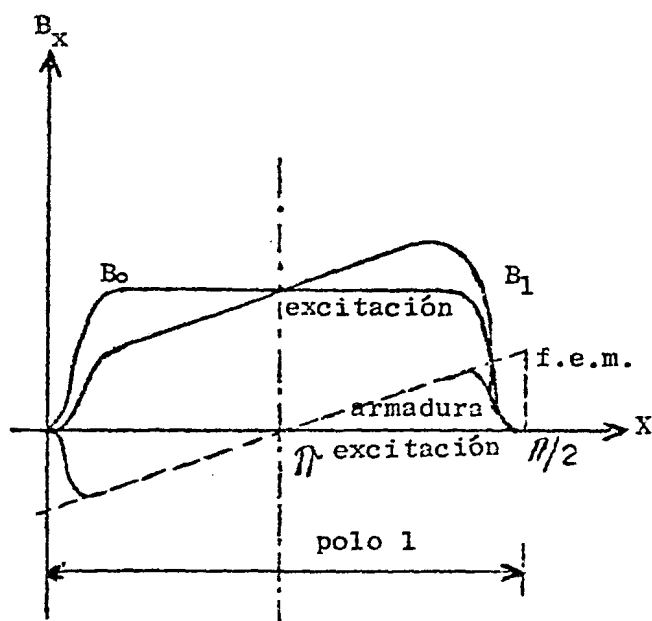


Fig.3.3.2. Gráfica de la distribución de flujo de la corriente de armadura.

Sí el eje de las escobillas es movido un ángulo α hacia la línea neutral como muestra la fig.3.3.3., la corriente de armadura induce un flujo el cual se puede descomponer a lo largo del eje principal como; ϕ_{q1} que es el flujo en cuadratura, y ϕ_{d2} que es el flujo a lo largo del eje directo. La suma vectorial del flujo de excitación esta representado por una expresión matemática, que es una ecuación polinomial, la cual se resuelve con un criterio de error pequeño.

La siguiente ecuación, es el estado para una -
excitación normal.

$$\xi(I) = K'(I) \cdot W \quad X$$

donde;

$$K'(I) = (1.24 + 4.55I + 4.66I^2 + 0.13I^3 + 3.98 \times 10^{-3} I^4) \times 10^{-3} \quad XI$$

i es valida sólo para; $I \leq 6.5$ amperes.

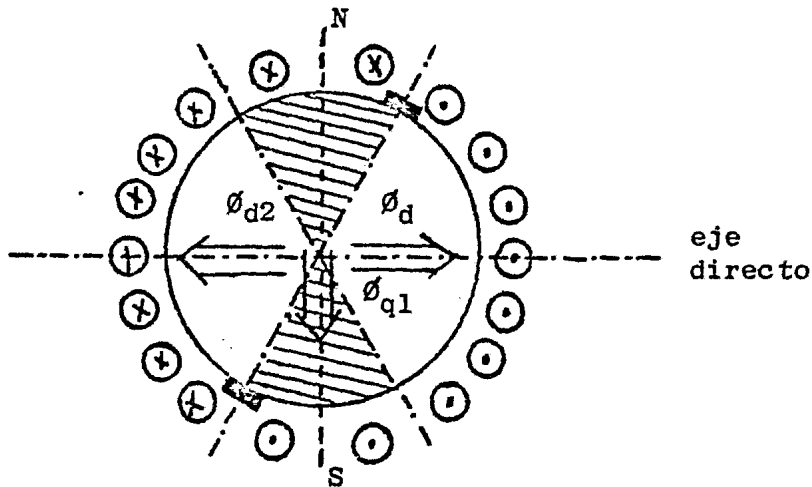


Fig.3.3.3. Grafica que nos muestra el giro de las escobillas
y el flujo de armadura a lo largo del eje directo.

Para la máquina P.M. la curva de la fig.3.3.5.
se a aproximado para una ecuación polinomial, para propósitos
prácticos, tenemos como base que (I) es también pequeño para
que tenga un efecto considerable en el resultado, por lo que
lo tomaremos como despreciable.

3.4 INDUCTANCIA DE ARMADURA.

Ya que se a descrito la forma para la medición de la reacción de armadura, se presentará sólo los resultados medidos de la inductancia dinámica de armadura para ambas máquinas, se dan en las fig.3.4.1.(a) y (b), habiéndose determinado la siguiente ecuación polinómica para tal efecto.

Máquina, E.M.;

$$L=50-6.85I-0.736I^2+0.215I^3 \quad \text{XII}$$

Sí; $I < 4.45$ amp. y $I \geq 4.45$ amp.

$$L=23.9 \text{ mh.}$$

Máquina, P.M.;

$$L=2.3-1.3I+0.9I^2-0.4I^3+0.07I^4-0.007I^5-0.0003I^6 \quad \text{XIII}$$

Sí; $I < 2.75$ amp. y $I \geq 2.75$ amp.

$$L=1.54 \text{ mh.}$$

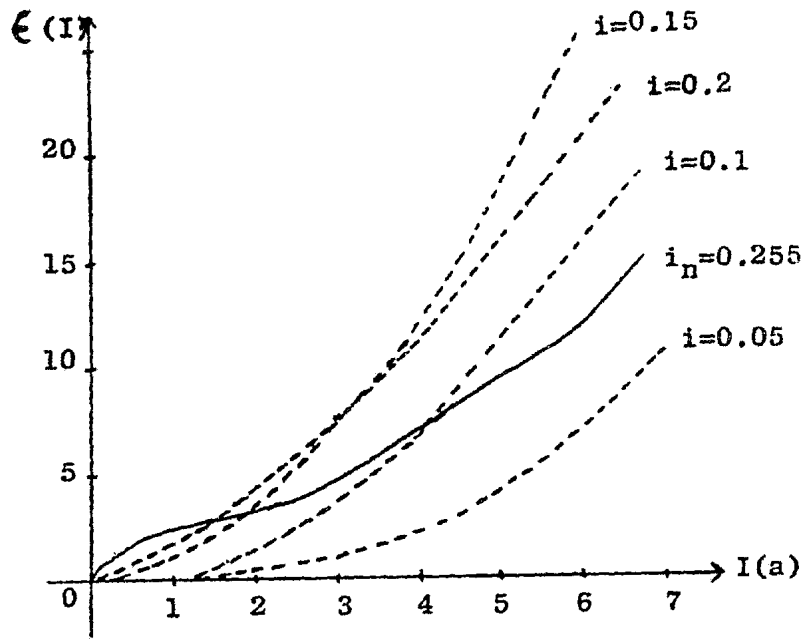


Fig.3.3.4. Grafica que muestra el voltaje de reacción de armadura para el motor E.M., para varias condiciones del campo.

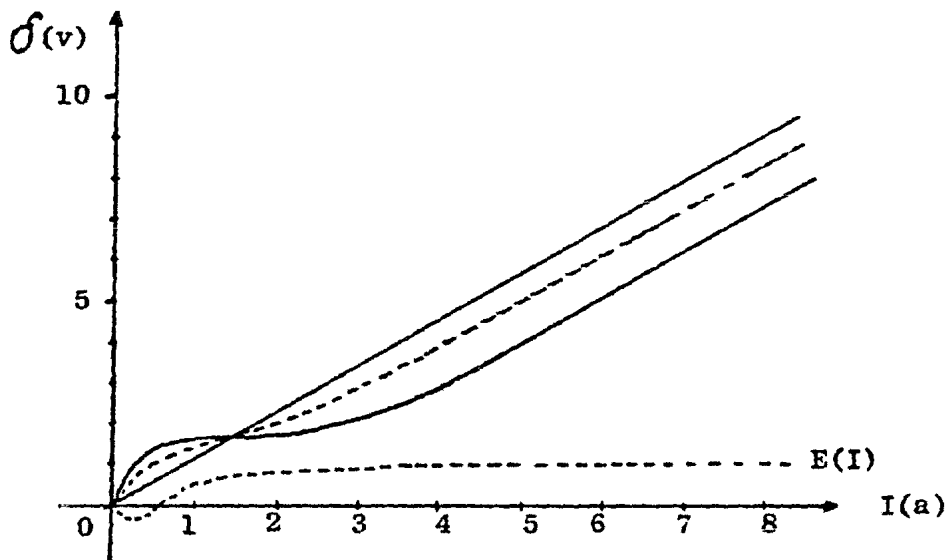


Fig.3.3.5. Grafica que muestra la caída de voltaje en las escobillas, así como la reacción de armadura para el motor P.M.

Esc. 1:75

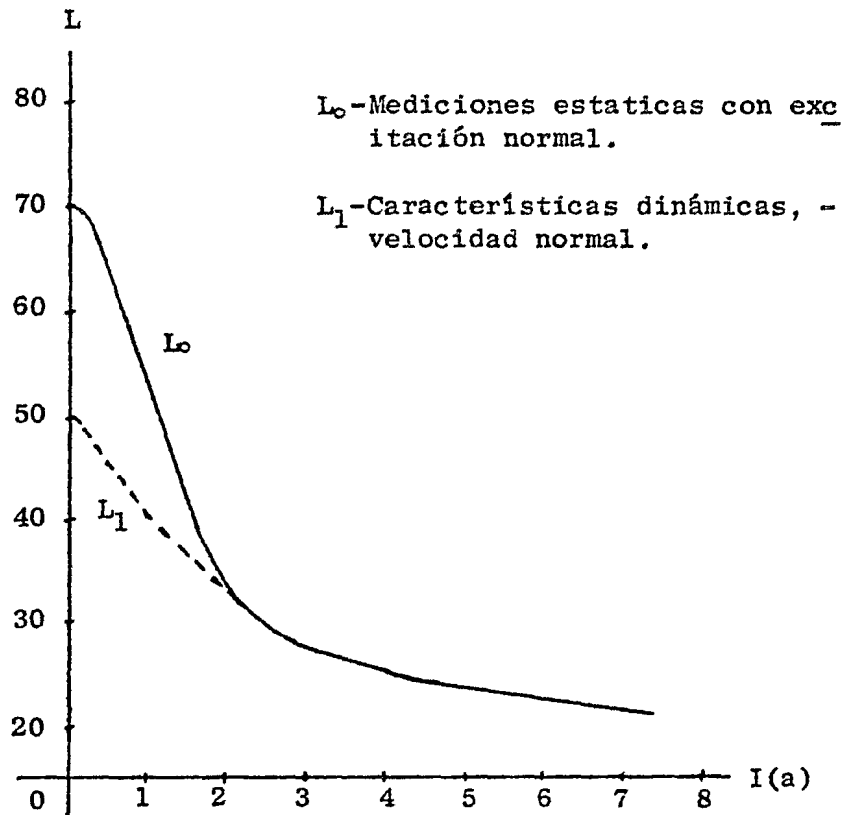


Fig.3.4.1. Grafica que muestra la inductancia dinámica de ar madura para una máquina E.M.
(a)

3.5 PARAMETROS MECANICOS.

La potencia suministrada a la arandura cuando la máquina gira y esta dada por:

$$P_g = U_m \cdot I$$

XIV

la energía disipada esta dada por $R.I^2$, las pérdidas por fricción del aire son proporcionales al cuadrado de la velocidad— así mismo las pérdidas debidas a la fricción mecánica son proporcionales a la velocidad (fricción de baleros y escobillas) por lo tanto podemos escribir:

$$P = R.I^2 + aW^2 + bW \quad \text{XV}$$

Realizando la prueba a diferentes velocidades— obtendremos los puntos representativos de una curva representativa de la ecuación XV, y expresa la fricción del par que se obtuvo de las características.

$$(U_m \cdot I - R.I^2) / W = aW + b \quad \text{XVI}$$

De el lado izquierdo de la ecuación XVI se calculo; U, I, y W, con R(I) previamente definida.

La curva experimental es una línea recta, des—preciando las pérdidas en la carga, los valores de los coeficientes a y b son:

$$\text{Máquina, E.M.} \quad a = 10^3 \text{ watt}/(\text{rad}/\text{seg})^2$$

$$b = 0.35 \text{ watt}/(\text{rad}/\text{seg})$$

$$\text{Máquina, P.M.} \quad a = 0.01 \text{ watt}/(\text{rad}/\text{seg})^2$$

$$b = 0.323 \text{ watt}/(\text{rad}/\text{seg})$$

Puesto que;

$$\lambda_m = aW + b + J \cdot (dW/dt) \quad \text{XVII}$$

El valor de J se determina, haciendo pruebas - con el motor en marcha. En carrera descendente el voltaje manejado (por el par elevado), es movido a una velocidad W, dará como resultado una ecuación diferencial, resolviendola con condiciones iniciales de, $t=0$ y $W=W_0$, y condiciones finales, $t_f=t$ y $W=0$, quedará:

$$J = a \cdot T / \log \cdot ((1+W_0) \cdot (a/B)) \quad \text{XVIII}$$

La prueba en descenso será portadora de la salida a velocidad inicial diferente. Resolviendo el sistema no lineal para, a, b, y J, estableciendo que los valores en un rango del 1% de variación respecto a estos mismos, en pruebas previas y la máquina con carga, se obtuvieron los siguientes resultados:

$$\text{Máquina, E.M.,} \quad J=0.015 \quad \text{Kg/m}^2$$

$$\text{Máquina, P.M.,} \quad J=0.019 \quad \text{Kg/m}^2$$

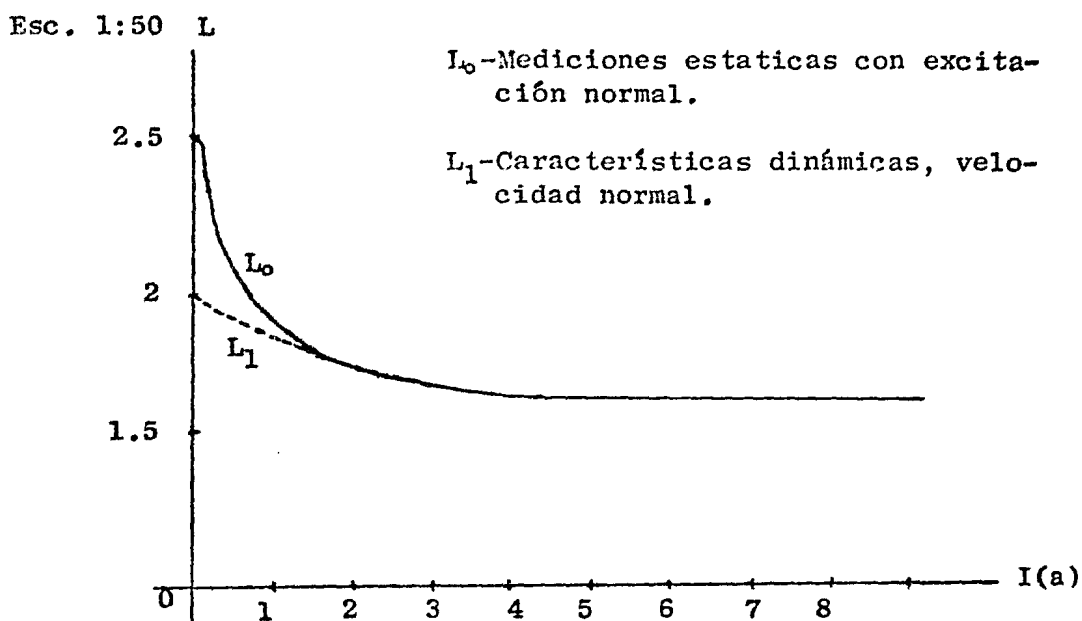


Fig.3.4.1.(b), Grafica que muestra la inductancia dinámica de armadura para una máquina P.M.

3.6 ECUACION GENERAL.

Una ecuación diferencial general para un motor de c.c., representativa de las máquinas, E.M. y P.M., en estudio se puede escribir como:

$$U(i) = E(i) + R(I) \cdot I + L(I) \left(\frac{dI}{dt} \right) - \epsilon(I, i) \quad \text{XIX}$$

La ecuación del par para el motor se puede derivar por la ley de la conservación de la energía, quedando:

$$\lambda_m W - (E - \epsilon) I = 0 \quad \text{XX}$$

y por las ecuaciones, IV, x, y XX, que combinandolas obtenemos:

$$\lambda_m = (K - K'(I))I \quad \text{XXI}$$

así mismo si combinamos, XVII y XXI, se obtiene:

$$(K - K')I = aW + b + J(dW/dt) + \lambda_r$$

El sistema general de ecuaciones diferenciales se resuelve por alguno de los metodos ya conocidos, con lo que obtenemos:

$$U_m(t) = KW - L'(I)W + R(I)I + L(I)(dI/dt)$$

XXII

$$KI = K'(I)I + aW + b + J(dW/dt) + \lambda_r$$

Si se suma una resistencia al circuito sumando la directamente a $R(I)$, él par resistivo λ_r debe estar en función de W ó de i (corriente), dependiendo cual característica es conocida, la ecuación XXII, no es valida para; $t=0$ si $I=0$, y $W=0$, condiciones de un instante antes del punto de arranque entonces:

$$dW/dt = (b + \lambda_r(0))/J$$

la cual bajo estas condiciones no puede ser mayor que cero. - se pueden aplicar a la ecuación XXII, las siguientes condiciones.

$$\text{Si } W=0 \text{ e } I \leq (b + \lambda_r(0)) / K ,$$

$$U = RI + L(dI/dt) \quad \text{XXIII}$$

$$W = 0$$

La medición física para estas condiciones, es función de una cierta corriente dada para generar el par, la que domina a la fricción antes de que el motor pueda arrancar.

3.7 MODELO LINEAL A TRAMOS.

El par debido a la fricción como se expresó en la ecuación XVI, es considerado como una función lineal de la velocidad.

La resistencia sin carga así como la inductancia sin carga de armadura son consideradas constantes y a la reacción de armadura se le considera despreciable, por lo tanto la ecuación XXII se convierte en:

$$U = KW + P_0 I + L(dI/dt) \quad \text{XXIV}$$

$$KI = aW + b + J(dW/dt) + \lambda_r$$

Que es un sistema de dos ecuaciones diferenciales de primer orden.

En este sistema de ecuaciones diferenciales es donde se hace la aproximación lineal, aplicando la transformada de Laplace, quedando:

$$W(s)K + I(s)(R + Ls) - LI_0 = U(s)$$

XXV

$$W(s)(a + Js) - KI(s) = JW_0 - (b/s)$$

Los coeficientes, a y b incluyen ahora al par-resistivo, tomando como una función lineal de la velocidad la determinación del sistema es representado por el determinante

$$\sigma = J L s^2 + s(RJ + aL) + aR + K^2$$

XXVI

los polos estarán dados por;

$$s_1 = \frac{-(RJ + aL) \pm \sqrt{(RJ + aL)^2 + 4JL(aR + K^2)}}{2JL}$$

XXVII

La ecuación general de la transformada de Laplace, para la velocidad y corriente son derivadas de la ecuación XXV y se obtiene;

$$W(s) = \frac{s^2 W_0 + s((K/J)I_0 + (R/L)W_0 - b/J) - (Rb/JL) + sU(s)(K/JL)}{s(s-s_1)(s-s_2)}$$

XXVIII

$$I(s) = \frac{s^2 I_0 + s((a/J)I_0 - (K/L)W_0) + (bK/JL) + ((sU(s) \cdot a)/JL) + ((s^2 U(s))/JL)}{s(s-s_1)(s-s_2)}$$

Como se vio en la discusión de la ecuación --- XXII la corriente debe elevarse a un valor B/K , antes que el-

motor arranque, en el dominio del tiempo la ecuación queda,--

$$I(t) = (U/R) \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad \text{XXIX}$$

para; $W(t)=0$ y para; $I(t) \leq b/K$, la L se toma cuando; $W=0$ dando un valor de 70 mh. (mili-henrris), para el motor E.M. y de 2.4 mh. Para el motor P.M.

En el momento del arranque del motor tenemos:

$$T_s = (L/R) \log(UK/(UK-Rb))$$

$$I(T_s) = b/K$$

XXX

Como; $U(s)=U/s$, y para el estado de condiciones iniciales anterior, aplicandolas a la ecuación XXVIII, -- quedará,

$$W(s) = \frac{((UK-Rb)/JL)}{s(s-s_1)(s-s_2)} \quad \text{XXXI}$$

$$I(s) = \frac{s^2(b/K) + s((ab/JK) + (U/L)) + ((bK-aU)/JL)}{s(s-s_1)(s-s_2)}$$

Se pueden transformar las ecuaciones XXXI en;

$$W(s) = W_s \left[\frac{1}{s} + \frac{(-s+2A)}{(s+A)^2+s} \right]$$

$$I(s) = (I_f/s) + \frac{(-I_f s + b)}{(s+A)^2+s} \quad \text{XXXII}$$

donde; $W_f = ((UK - bR) / (aR - K^2))$, estado final estable de la velocidad.

$I_f = ((bK + aU) / (aR - K^2))$, estado final estable de corriente.

$$\text{Donde; } A = (1/2) \cdot ((R/L) + (a/J))$$

$$\text{y; } S = ((aR + K^2) / JL) \cdot A$$

o si se quiere;

$$S = (K^2 / JL) - (1/4) \cdot ((R/L) - (a/J))$$

$$B = ((ab / JK) + (U/L)) - 2AI_f$$

Caso 1, de oscilación amortiguada, W es positiva para la ecuación XXXII, y encontrando la transformada inversa de laplace, para determinar sus parámetros.

$$W(t) = W_f + W_1 e^{-St} \text{sen}(\sqrt{S}t + \phi) \quad \text{XXXIII}$$

$$W_1 = (W_f / S) \sqrt{S + (((ab) / (JK)) + (U/L) - A)^2}$$

$$\phi = \tan^{-1}(\sqrt{S} / ((ab / JK) + (U/L) - A))$$

$$i(t) = I_f + I_1 e^{-St} \text{sen}(\sqrt{S}t + U)$$

$$I_1 = (I_f / S) \sqrt{S + (((ab / JK) + (U/L)) / I_f) - A)^2} \quad \text{XXXIV}$$

donde;

$$U = \tan^{-1}((- \sqrt{S} I_f) / ((ab / JK) + (U/L) - AI_f))$$

Caso 2, amortiguamiento crítico, $S=0$ ó más --

bien;

$$4K^2 = RJ - aL \quad \text{XXXV}$$

$$W(t) = W_f (1 - e^{-At} + 3At e^{-At})$$

$$I(t) = I_f (1 - e^{-At}) + (B + AI_f) t e^{-At} \quad \text{XXXVI}$$

Caso 3, sobreamortiguado $S < 0$.

$$W(t) = W_f \left(1 + \left(\frac{s_2}{s_1 - s_2} \right) e^{s_1 t} + \left(\frac{s_1}{s_2 - s_1} \right) e^{s_2 t} \right) \quad \text{XXXVII}$$

con;

$$s_1 = -A + \sqrt{-S}$$

$$s_2 = -A - \sqrt{-S}$$

$$I(t) = I_f + \frac{B - s_1 I_f}{s_1 - s_2} e^{s_1 t} - \frac{B - s_2 I_f}{s_1 - s_2} e^{s_2 t} \quad \text{XXXVIII}$$

3.8 FUNCION DE TRANSFERENCIA.

En la mayor parte de los libros de la teoría de control, los modelos lineales simples se usan para obtener una función de transferencia. Por ejemplo, desarrollando un modelo para despreciar la constante de fricción "b", para esto tomamos a la ecuación, XVI

La resistencia de armadura e inductancia, se toman como constantes y tomando en cuenta que la reacción de armadura es pequeña, por tanto la ecuación XXIV se reduce a la forma;

$$U = KW + RI + L(dI/dt). \quad \text{XXXIX}$$

$$KI = aW + J(dW/dt) + \lambda_r \quad \text{XL}$$

λ_r se considera como una perturbación u oscilación del par, si $\lambda_r = 0$, entonces la función de transferencia de la velocidad se puede obtener directamente como;

$$H(s) = (W(s)/U(s)) = \frac{K}{K^2 + (R + Ls)(a + Js)}$$

y arreglandola:

$$H(s) = \frac{K/JL}{(s-s_1)(s-s_2)} \quad \text{XLI}$$

Donde s_1 y s_2 estan dados por la ecuación. --- XXVII, y la función de transferencia de la corriente esta dada por:

$$H(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{(1/L)((a/J) + s)}{(s-s_1)(s-s_2)} \quad \text{XLII}$$

3.9 DIAGRAMA DE BLOQUES Y SIMULACION ANALOGICA.

Para la ecuación XXIV el diagrama de bloques-- de la fig.3.9.1., se puede obtener condicionando a $b=0$, debido a una perturbación y el diagrama de bloques para la función de transferencia de XLI se obtiene de la misma forma.

Una simulación exacta en una computadora aná-- logica se lleva a cabo usando generadores de función para representar a $R(I)$, y se puede hacer una mejora del modelo por medio de la generación de;

$1/L(I)$, $K/L(I)$, $R(I)/L(I)$, y usando multiplicadores se lleva a cabo la simulación exacta de la ecuación, de safortunadamente la inexactitud de los multiplicadores hace - que se introduzca un error que puede ser más alto que el va-- lor del resultado obtenido debido a la situación de $L(I)$ que se toma como una constante, un valor medio para el motor P.M. es de 1.9 mh. Un esquema del alambrado lo da la fig.3.9.2.;-- mostrando también el error, lo que se puede transformar facilmente por medio del modelo líneal, la simulación para el mo-- tor P.M. para este modelo se lleva a cabo de forma muy exacta con las siguientes relaciones:

$$t_1 = Tt, \quad I_1 = I, \quad W_1 = BW, \quad O_1 = r\theta \quad \text{XLIII}$$

estas relaciones, estan en función del voltaje de salida y re-
presentan a dicho voltaje, la ecuación que cuantifica el ----
error de cada parámetro es;

$$\frac{dI_1}{dt_1} = (\infty t / TL) U(t_1) - (\infty K / TBL) W_1 - \frac{R((1/\infty) I_1) I_1}{T.L}$$

$$\frac{dW_1}{dt_1} = \frac{BK}{T\infty J} \cdot I_1 - \frac{a}{TJ} \cdot W_1 - \frac{B}{TJ} (b + \lambda_r(t_1))$$

XLIV

$$\frac{d\theta}{dt_1} = (r/TB) \cdot W_1$$

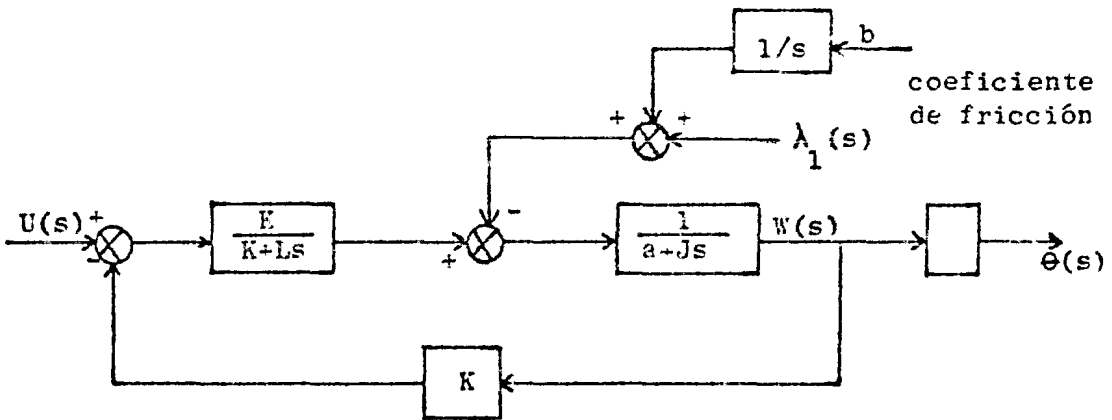


Fig.3.9.1. Diagrama de bloques. que representa a la función--
de transferencia de un motor de corriente continua
controlado por armadura.

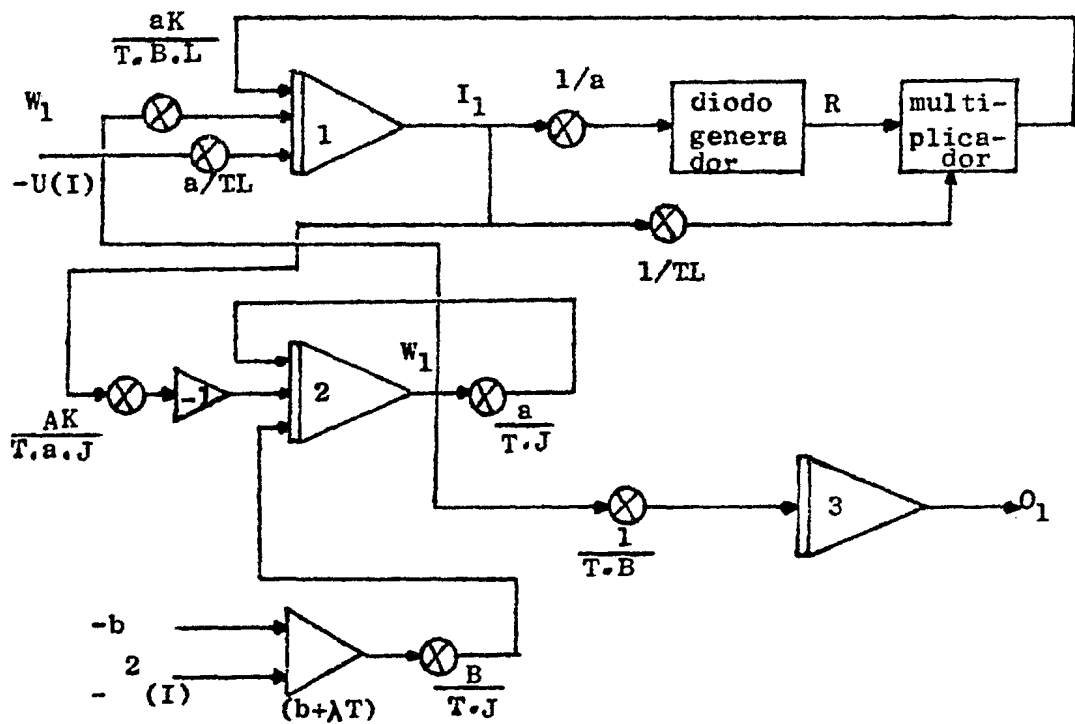


Fig.3.9.2. Diagrama de alambrado de la simulación de la función de transferencia de un motor de c.c., para una computadora analógica.

La simulación analógica, nos permite hacer estudios de simulación análogos a los modelos reales para el diseño de motores, de velocidad controlada para una cierta pendiente de estabilización, con constante de tiempo de $T=10^3$ y -

con un alto orden de transitorios presentes en la simulación y que se pueden estudiar facilmente con esta herramienta.

3.10 COMPARACION DE LOS MODELOS.

En muchos modelos experimentales simples, se puede llevar a cabo una comparación de ellos para apegarlos a modelos reales. En el caso del motor E.M., una resistencia de 30 ohm se introduce en serie con la armadura para limitar la corriente, y se aplica un voltaje de 200 vlts, donde el inicio del flujo de la corriente y la velocidad inicial son registrados para hacer las comparaciones pertinentes.

La solución de las ecuaciones, XXII y XXIII -- con la ayuda de una computadora digital nos dará la grafica de unas curvas las cuales no se pueden diferenciar debido a la circunstancia del pico de corriente originado por el calculo y puede ser de hasta 7.3 amperes y con tiempos de $5 < t < 2.25$ mili-seg., que es parecido a los datos obtenidos con un modelo lineal a tramos, que dio una $I_{max}=6.74$ amperes y un tiempo de $t=12$ mili-seg., el valor del tiempo es muy diferente ya que se eleva a más de dos veces que el valor real.

La función de transferencia del modelo en prueba, en comparación con una real, da tiempos iguales y la misma amplitud para el pico de corriente, pero en el estado estable final de la corriente y velocidad tienen diferencias considerables.

La fig.3.10.1., muestra la elevación de la curva de corriente par los diferentes modelos, mostrados para I_{nL} e I_L donde el transitorio de corriente es diferente en el modelo no lineal así como en el modelo lineal a tramos debido a su estabilidad, el estado mostrado es el mismo para ambos-- sin embargo el caso lineal de un error de 62% respecto al estado final, así mismo sobre el transitorio que el modelo lineal a tramos. La fig.3.10.2., muestra curvas análogas para el punto en el momento de arranque del motor P.M., los resultados basicos son semejantes a los del motor E.M.

El error introducido en el modelo lineal a tramos es pequeño para el motor E.M., debido a que la reacción de armadura es muy baja.

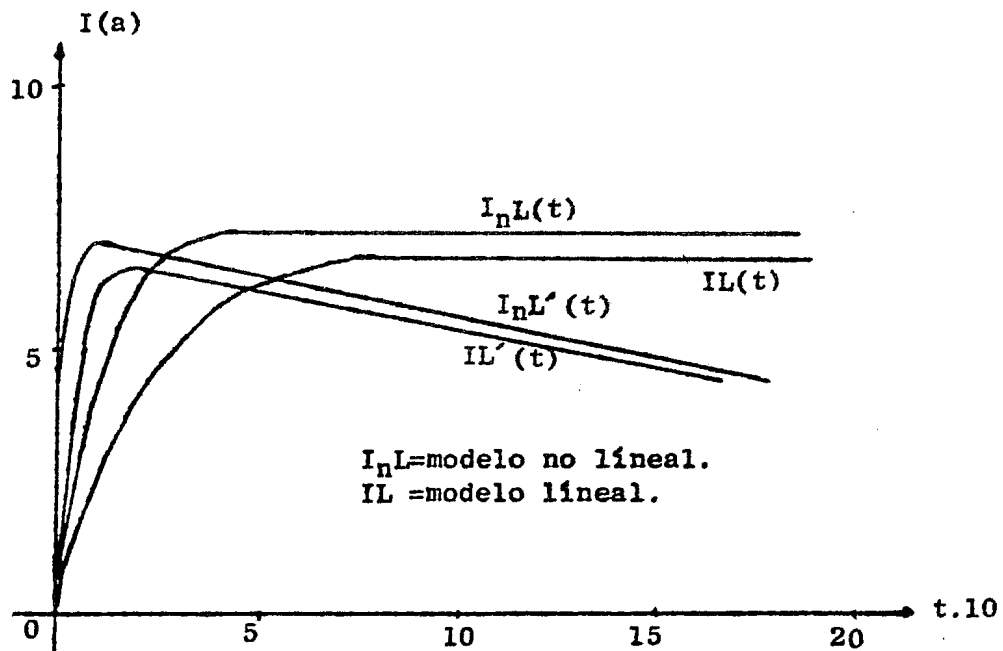


Fig.3.10.1. Curvas de comparación de las características de - corriente de un motor E.M., al momento de arranque

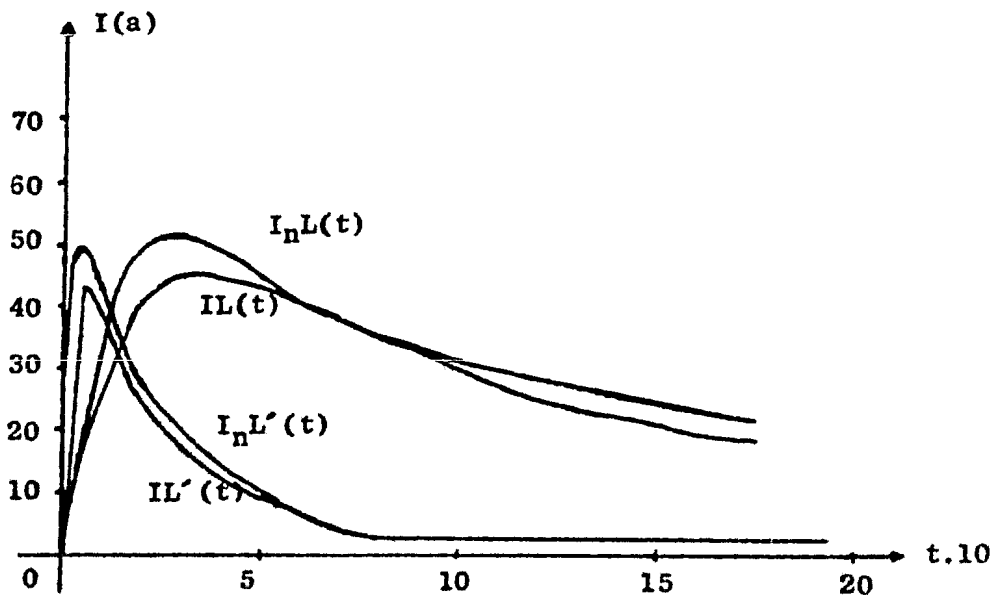


Fig.3.10.2. Curvas de comparación de las características de - corriente de un motor P.M., al momento de arranque

La fig.3.10.3., nos muestra el estado correspondiente para la velocidad de un motor P.M., bajo las mismas condiciones anteriores, una diferencia pero limitada, aparece en el transitorio pero los demas valores estan dentro de rangos razonables, el modelo lineal da los transitorios iguales así como el modelo lineal a tramos, su estado estable de uno de ellos difiere sólo en 1% del valor real. Este experimento nos muestra la validez del modelo no lineal dandonos el rango de exactitud que nos brinda el modelo lineal a tramos ó modelo lineal.

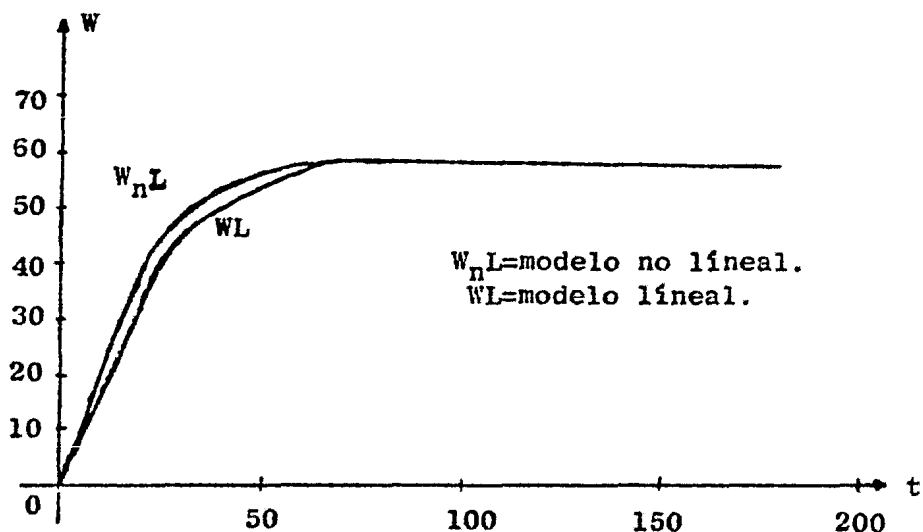


Fig.3.10.3. Curvas de características para la velocidad inicial de una máquina P.M.

3.11 CONCLUSIONES.

Una investigación de los parámetros de una máquina de c.c., que resultaron en el desarrollo de un modelo matemático exacto derivado de un modelo lineal a tramos que originalmente era un caso no lineal, para el estado estable los resultados obtenidos para cada modelo son similares a un modelo lineal.

Es más fácil tratar en la mayoría de las aplicaciones un modelo linealizado, usado por la simplicidad de su transformación pasándolo fácilmente a un diseño simple usando los criterios de Bode y Nyquist.

En los transitorios de corriente debidos a la regulación del par ó al control de la velocidad, aplicado en el modelo lineal a tramos y aunado a la simplicidad para transformar el modelo. Se a mostrado que usando un motor de imán permanente el frenado eléctrico es más seguro, estando el error de estos motores en un 10%.

El modelo exacto del motor permite excelentes pronosticos del funcionamiento de un motor de c.c. Si se adapta e introduce un control obtimo y ayudandoce con una computa

dora digital la que permite usar el modelo lineal a tramos---
dandonos resultados muy apegados a la realidad.

Usualmente la máquina P.M., trabaja en una región de la característica de magnetización, la cual es menos saturada que para la máquina E.M., por esto la reacción de armadura en el eje de cuadratura es menor que en la máquina E.M. esto se denota en el efecto de conmutación, el eje de las escobillas se desvia hacia el eje neutro debido a que la densidad de corriente en las escobillas no es simétrico, se puede pensar en un cambio imaginario, uniendo el alineamiento geométrico, ya que este es periodico.

Por medio de la fig.3.11.1., se puede hacer un análisis del comportamiento de los diferentes flujos. La componente a lo largo del eje (q_b), perpendicular al eje imaginario de las escobillas (b), genera la f.e.m., utilizada. En -- una máquina E.M., el eje en cuadratura tiene una alta reluctancia por lo que el cambio del eje de las escobillas no afectara al flujo en cuadratura ϕ_q , pero en el eje de directa hay una reluctancia baja y el flujo resultante debido al desplazamiento es relativamente alto como se muestra en la fig.3.11.1 para ϕ_{d2} .

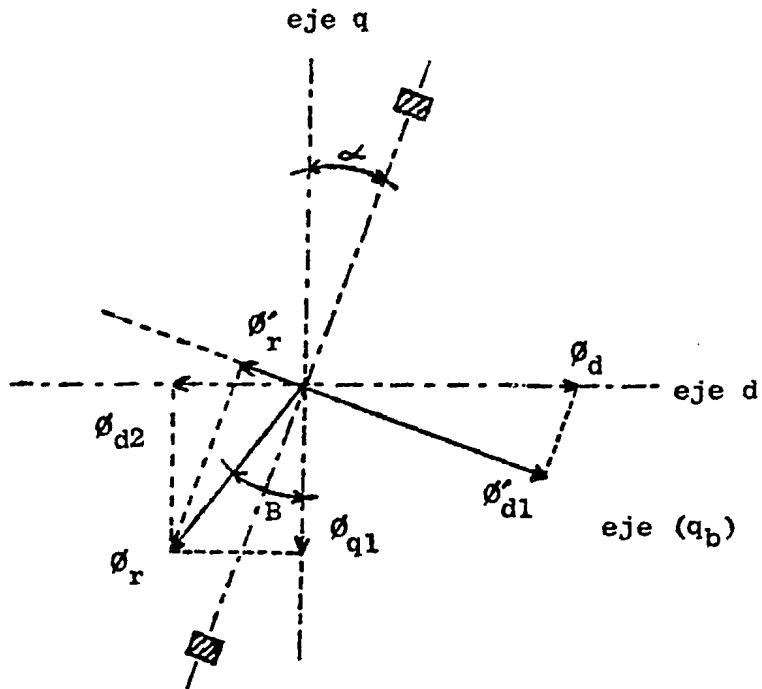


Fig.3.11.1. Grafica del análisis vectorial de los flujos en una máquina, E.M.

El vector resultante del flujo ϕ_r , tiende a rotar más que el ángulo α y la componente de ϕ_r sobre el eje -- (qb), es opuesto a la componenete de flujo ϕ_{d1} sobre el mismo eje, la resultante de la reacción de armadura en el eje directo es positiva, y la acción en contra de la excitación de -- ϕ_{d2} , se desarrolla con la corriente de carga así como la reacción de armadura hasta que ocurre la saturación. En una máquina P.M., el eje de directa tiene una alta reluctancia, esta -

se debe a la a la baja permeancia de los materiales magnéti -
 cos de que se construyen los polos, y a la reluctancia en cuadratura
 que es relativamente baja por lo que el desplazamiento
 causará un incremento de el flujo en cuadratura, pero ϕ_{d2} ,
 es relativamente pequeño cuando se hace la comparación con la
 reluctancia del eje de directa. La fig.3.11.2., nos muestra -
 que el flujo resultante ϕ_r tiene rotación del ángulo B, el cual
 decrece respecto al ángulo α con lo que la componente activa
 del flujo ϕ'_r , sobre el eje (q_d), que se suma a la componente
 activa del flujo ϕ'_{d1} , luego la reacción de armadura en el-
 eje de directa, suma estos efectos al flujo debido a la exci-
 tación en tanto el resto de las componentes de flujo en cuadratura
 se restan.

El resultado es una reacción de armadura muy--
 baja en el plano negativo para una corriente de armadura pe--
 queña, estos puntos de inspección teorica y de acuerdo con la
 curva experimental de la fig.3.3.4., para la máquina E.M., y-
 a la fig.3.3.5., para la máquina P.M., con lo cual se justifica
 la limitación de la reacción de armadura que se establecio.

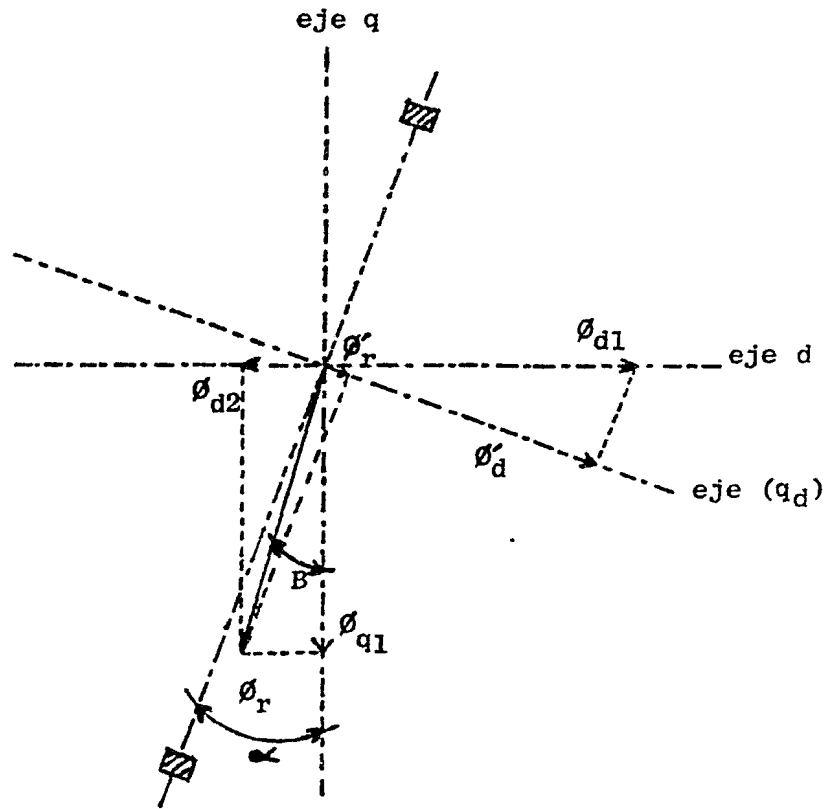


Fig.3.11.2. Grafica del análisis vectorial de los flujos en -
una máquina, P.M.

4. APLICACIONES.

La única diferencia entre motores de imán permanente y motores convencionales, es la forma de establecer su campo magnético.

Los motores de imán permanente en algunos casos usan un cierto tipo de imán de cerámica el cual tiene una elevada concentración de energía ($B \times H$), un prototipo de estos es el elemento ALNICO.

4.1 DESARROLLO DEL SERVO-MOTOR DE C.C. DE IMAN PERMANENTE DE COBALTO-SAMARIUM.

Análizando el rango de un motor de c.c., de imán permanente de cobalto-samarium (aleación de materiales magnéticos).

Haciendo una breve descripción de las propiedades magnéticas de ciertas aleaciones que se han elaborado con elementos, de tierras raras que poseen propiedades magnéticas permanentes, estas tienen consideraciones particulares debido a la solidez del campo que producen y a su energía que posee-

la que es inigualable y muy económica. El servo-motor se construye de modo que se puede ajustar el diseño de acuerdo a las características de estos materiales.

La existencia de materiales de imán permanente a ayudado a desarrollar su uso en motores eléctricos y aumentando por consiguiente la comercialización de materiales con propiedades magnéticas como el, cobalto y samarium cuya fórmula de aleación es; SmCo_5 .

El Samarium, elemento del grupo de tierras raras de la tabla periodica de los elementos, que al ser combinado con el Cobalto se produce un material magnético de gran rigidez. Tambien se han identificado otras aleaciones del cobalto con otras tierras raras como el, Praesiodimium-cobalto- en esta aleación se han obtenido mejoras en sus propiedades magnéticas.

El Cerium-Mischmetal-Cobalto, es una aleación con bajo costo de los materiales magnéticos que lo integran, el Samarium es un material relativamente costoso por la refinación a que se debe de someter. El material de lija Monazite es un material del subgrupo de las tierras raras que tambien-

requiere de una cierta refinación.

Las fuentes ó mantos de cobalto son relativamente abundantes , superiores a las conocidas hasta hoy, este material tiene una gran vulnerabilidad.

4.2 CARACTERISTICAS MAGNETICAS.

Las características magnéticas del cobalto-samarium, tienen gran importancia respecto a otros materiales magnéticos rígidos, se han recopilado curvas de desmagnetización para algunas aleaciones y grupos de estos materiales -- para diferentes tipos de construcciones.

En la tabla de la fig.4.2.1., el eje vertical de la curva B-H representa los diferentes valores de la densidad de flujo entre los grupos, el eje horizontal corresponde al producto de energía $B \times H$ para un grupo considerado.

Seleccionando un punto que determine el volumen de material magnético que se requiere, esto es; longitud y área de la sección transversal de éste.

El punto de operación para el grupo A, cobalto

Símbolo	B_r remanencia	H_c coercitividad	(BH) máx.
Unidades	(T)	(KA/m)	(KJ/m ³)
Grupo A	0.2-0.39	135-240	8-28
Grupo B	1.2-1.35	45-65	30-70
Grupo C	0.75-1.1	35-150	30-70
Sm Co5	0.7-0.9	540-660	100-160

▲ Regiones de máximo producto de energía (BH) Máx.

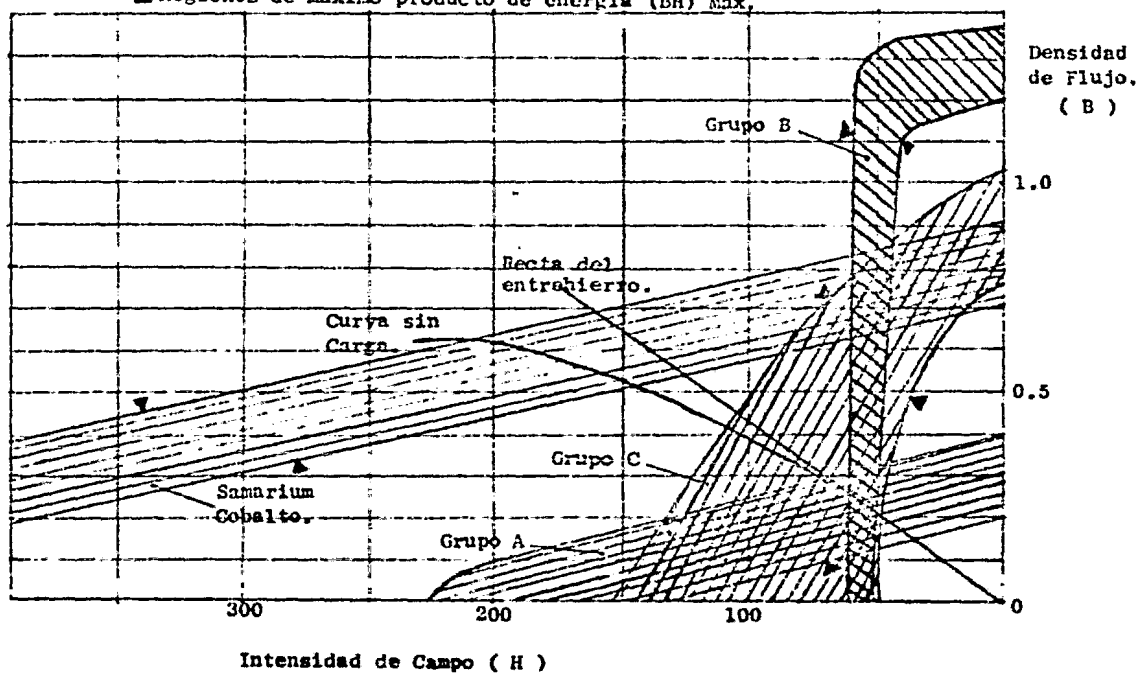


fig. 4.2.1. Curvas de desmagnetización, para diferentes grupos de materiales, así como de la aleación de Cobalto y Samarium.

-samarium esta sobre la curva de desmagnetización temporal, - en cambio los materiales de los grupos B y C, tienen características contrarias a las del grupo A, la posición seleccionada en la curva es un producto de energía B.H, que es el máximo por unidad de volumen.

Los materiales del grupo A, de la clasificación cerámica-ferrita, tiene gran demanda debido a sus bajos costos pero los motores fabricados con esta aleación son volumininosos y con altas temperaturas, la curva de desmagnetización de estos materiales tienen una curva semejante a la curva de la aleación cobalto-samarium, pero con un nivel de energía -- muy bajo para un funcionamiento similar, la longitud es dos-- veces mayor que usando el material cobalto-samarium, así mismo dos veces el área, la densidad de flujo es la mitad de la del cobalto-samarium. El par motor tiene un decrecimiento proporcional, pero este se puede recuperar haciendo un ajuste en las muescas del motor, estas están localizadas en los dientes de entalladura, esto hace que se incremente la carga eléctrica.

Los materiales del grupo B tienen una remanencia elevada y baja coercitividad, un ejemplo de estas aleaciones es la aleación de Alcomaz-Alnico.

Estos operan con una desmagnetización lineal - por lo que se requiere seleccionar un punto en el cual se obtenga una reserva de la densidad de campo, que aumente el efecto de reacción de armadura, el valor del producto de energía es sensible a la selección de la densidad de campo H_m , este se reduce para una demanda máxima en un factor de, H_m/H_c , donde H_c es la coercitividad del material.

Por las restricciones en estos materiales el motor deberá de ser muy económico, la densidad del campo será proporcionada por 4 polos con un flujo a través del entrehierro, la longitud del radio, en la armadura deberá de ser menor para la optimización de parámetros de funcionamiento del servo-motor.

Las piezas polares permiten libertad en el ajuste y selección de la relación de magnetización la cual con carga eléctrica es del, 20% al 30%, con menos eficiencia del flujo a través de las ranuras de modo que la fuente de excitación es adyacente al entrehierro.

Los materiales del grupo B tienen un producto de energía para un punto de operación tal que al seleccionar el máximo valor para las dimensiones del imán, en relación---

al material cobalto-samarium, este es de 3 a 4 veces el volumen, y de 6 a 8 veces la longitud.

El grupo C, lo integran metales con una alta--coercitividad, uno de ellos es el Hycomhx-III que es uno de los más efectivos debido a los altos niveles aprovechables de su densidad de flujo, estos se encuentran dentro del rango --del cobalto-samarium. El porcentaje aprovechable de su pro --ducto de energía es del 60% al 70% de los máximos valores de modo que se requiere un volumen de este material, de 3 a 4 veces que el del cobalto-samarium.

Se hace una aproximación a los diseños, en el tamaño de la carcasa en función del campo, pero el material--de cobalto-samarium, tiene una gran extensión de su campo sobre el rango de materiales imantados usados en el diseño de --motores, teniendo ventajas en; volumen, área y longitud aun --sobre los de materiales de cerámica y materiales de los grupos B y C, el coeficiente térmico de temperatura es de 0.04%--grados centígrados.

4.3 DISEÑO DEL MOTOR.

La selección del punto de operación no se dificulta para el cobalto-samarium, correspondiente a la región de máxima energía, la longitud del imán es función de la longitud del entrehierro.

La economización en las dimensiones del imán - están en función del material y las características de este, - el aprovechamiento de la energía de excitación y la densidad del flujo del imán, es proporcionalmente ventajoso por el incremento en la magnetización y el costo de esta. Si se incrementa la longitud del imán en tres veces el máximo producto de energía aumenta proporcionalmente la densidad de flujo, incrementando con esto la región de excitación y el par del motor en un factor de 1.5 del total de la energía magnética, - la potencia se incrementa en un 2.5, la velocidad y el tiempo de respuesta son regulados, aunque se desprecia la (CET), costante eléctrica de tiempo ya que es muy pequeña.

Incrementando 7 veces la longitud del imán el factor se incrementará en 1.75 y $(1.75)^2$, es común la producción de servo-motores de coraza con 2 ó 4 polos, con campo --

producido con imanes de cerámica la cual reduce el costo para el punto de operación en valores de 85%, en la densidad del flujo. Un cierto volumen económico nos permite aprovechar la excitación del entrehierro, si se incrementara el claro del entrehierro el flujo emitido por las caras polares no ayuda a reducir la inductancia de la armadura por lo que los efectos de reacción de armadura no disminuyen, esto también se debe a que la permitividad de los materiales magnéticos es baja -- por lo que en el entrehierro la trayectoria del flujo no aumenta la reluctancia., conforme a la curva del material cobalto-samarium de modo que hay una desmagnetización reversible del imán la cual está sujeta a la reacción de armadura.

La ampliación del límite de conmutación es función de la variación de las escobillas e inductancia de la armadura. El par y el voltaje en la armadura es la primera consideración para determinar la longitud ó claro del entrehierro.

Empleando el motor en un rango útil se incrementa la respuesta con una constante de tiempo más pequeña, una computadora es una herramienta que nos proporciona un análisis detallado del funcionamiento de un motor de imán permanente, dimensiones y curvas características del imán requerido.

4.4. DESARROLLO DEL MOTOR.

Una lista de parametros de funcionamiento para un rango de la aleación SmCo_5 , en el diseño de cuatro motores refiriendonos al diseño N. 2 siendo una versión del diseño N. 1, el cual contiene cojinetes de empuje los que ayudan a contrarrestar el choque axial de la carga en ambas direcciones, - en el diseño N. 3, que a su vez es una versión del diseño N.2 tiene un incremento en la longitud del entrehierro, el par es proporcional al voltaje de arranque con una constante de tiempo $(SK)^{-1}$ donde S es la regulación de la velocidad y K es - la sensibilidad del par, comparando las columnas de voltaje-- de arranque la longitud del entrehierro tiende a incrementarse.

El diseño del motor N. 4, que es el más pequeño y de más bajo costo en el material magnético, con un punto de operación en la región de máximo producto de energía.

El servomotor es de operación transitoria y tiene un funcionamiento normal en estado estable.

Las fig.4.4.1., y 4.4.2., se muestran los re-- sultados obtenidos de los diferentes tipos de pruebas en el -

Parametros de funcionamiento de motores. de c.c. de iman permanente.
de Cobalto y Samarium.

Descripción de Parametros.

Datos Mecánicos.	Unidades	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
Peso.....	Kg.	0.91	0.857	0.690	0.200
Diametro.....	Metro	0.045	0.045	0.045	0.028
Longitud.....	Metro	0.126	0.104	0.100	0.060
Carga.....	Newtons	-----	3150 y más	3150 y más	-----

Constantes del motor.

Constante térmica..min.		-----	6.5	6.5	-----
" elétrico..seg.x10 ⁻³		-----	0.9	-----	-----
" mecánica..seg.x10 ⁻³		6.4	6.4	6.0	10

Constantes de tiempo.

Regulación.....	rad./Nanseg.	510	770	725	8000
Inercia.....	Kg.M ² x 10 ⁻⁷	119	83	83	15
Temperatura ambi. °C		-30 a 60	-30 a 60	-30 a 60	-5 a 60

Constantes del debanado.

Fuerza contra - eléctromotriz...	volts seg./rad.	0.068	0.055	0.065	0.015
Par/amp.....	Nm/amp.	0.068	0.055	0.065	0.015
Inductancia.....	H. x 10 ⁻³	-----	2.2	-----	-----
Resistencia.....	ohms a 20°C	2.0	2.4	2.8	1.5
Voltaje de arran- que.....	volt.a 20°C	-----	2.0	0.8	-----

Funcionamiento a 28v 20°C.

Velocidad en va- cio.....	rpm.	3930	4600	3800	16600
Par al freno....	Nw-M	0.95	0.63	0.65	0.28
Corriente al freno.	Amp.	14.0	11.6	10.0	18.0
Potencia máxima.	Watt	88	75	65	87
Potencia Promedio	Watt	-----	66	58	53
Tiempo.....	min.	-----	1	1	60

Límite de conmutación.

Par.....	Nw-M	-----	0.45	-----	-----
Velocidad.....	rpm.	-----	8000	-----	-----

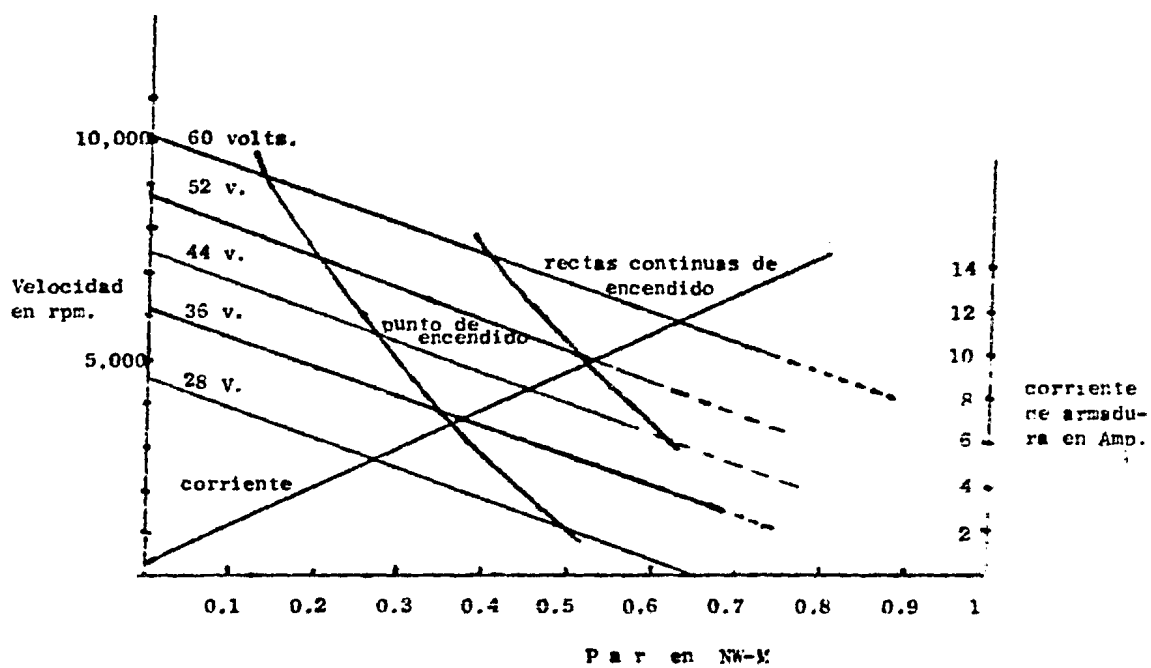
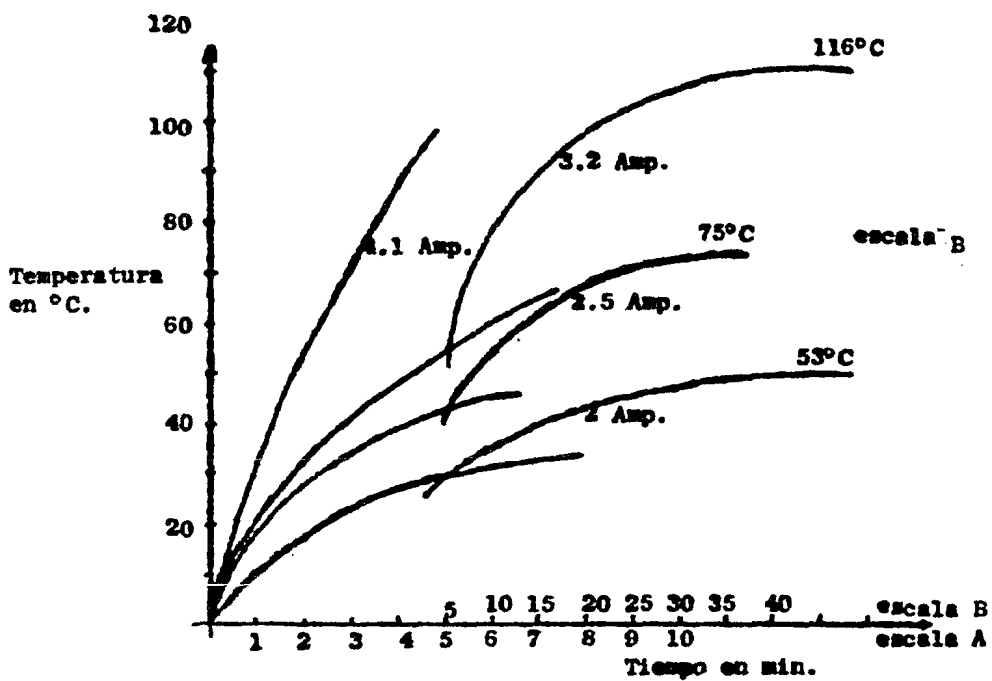


fig. 4.4.1. Grafica de zonas de conmutación, para un motor de c.c. de iman permanente, de cobalto y samarium.



Desboque de motor estandarizado.
 T_{th} , Constante térmica de tiempo=6.1-7.5 min.
 R_{th} , Resistencia térmica.=3.5-3.8 °C/Watt.

fig.4.1.2. Grafica de constantes térmicas de tiempo para un motor de c.c. de iman permanente, de cobalto y samarium.

diseño del motor N. 2, y en la fig.4.4.3., es un prototipo de este diseño.

En la grafica de la fig.4.4.4., se muestra la CET., con el motor en marcha con un voltaje de 28 volts de c.c., en la fig.4.4.1., se da la velocidad en relación a este voltaje, así como el par y el valor instantaneo de la resistencia de armadura, en el calculo de la resistencia térmica de armadura, se hace en función del calor almacenado en la armadura del calor disipado por el hierro, fricción y perdidas en el enrrollado.

El tiempo en el que se eleva la corriente, se representa por el paso del voltaje de entrada mostrado en la fig.4.4.4.(b), con una carga de 10.8 Kg. y un tiempo de elevación de 0.3 seg., la fricción viscosa y el acoplamiento rígido son despreciables pero estos se pueden corregir en el acoplamiento con la carga, la inercia se localiza en la tabla I dando un valor de 78 gr-cm, y una constante mecánica de tiempo (CTM), de 6.4 miliseg.

La fig.4.4.5., nos muestra la banda media donde es sujetado el motor con voltaje de 28 volts que suministra una señal senoidal de 8 volts de pico a pico en una banda media de 3 decibeles que es igual a 25 hz. (6.5 miliseg.).

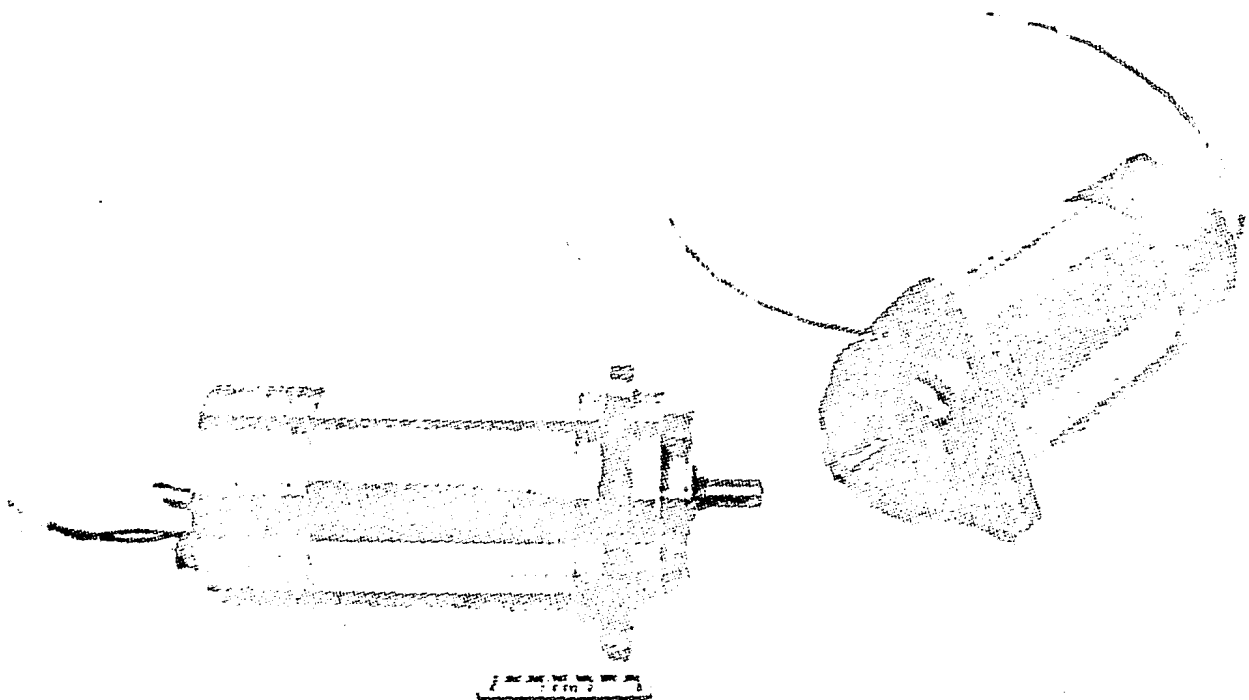
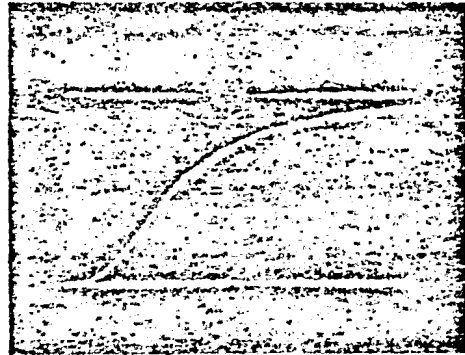


Fig. 4.4.3. Representación fotográfica de motor de c.c. de -
Imán permanente, referido a la tabla, es el mo--
tor N° 2.



0.9 msec. tiempo de elevación.
1 msec./div.

(a)-Constante eléctrica de tiempo



7.3 msec. tiempo de elevación.
2 msec./div.

(b)-Constante mecánica de tiempo.

fig. 4.4.4. Constantes eléctrica y mecánica de tiempo para una Máquina de c.c. de iman permanente, en particular de Cobalto y Samarium.

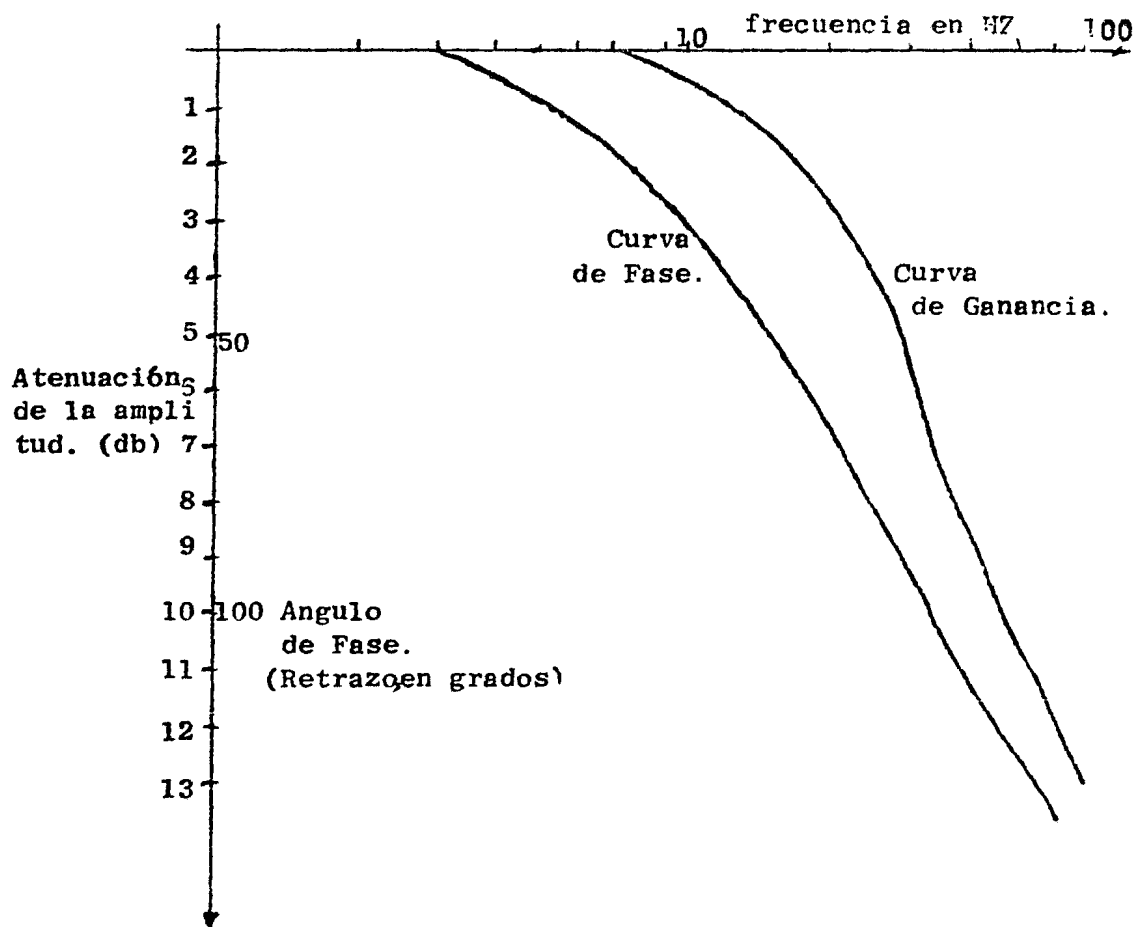


fig.4.4.5. GRAFICA DE RESPUESTA EN FRECUENCIA PARA UN MOTOR DE IMAN PERMANENTE DE COBALTO Y SAMARIUM.

Refiriendonos nuevamente a la fig.4.4.1., que nos presenta las curvas de par-velocidad y corriente, localizandoce las diferentes zonas de conmutación, mostrandose que la sensibilidad del par es lineal.

El imán Alnico mantiene su campo con el paso del tiempo teniendo perdidas de sólo 1% a través de varios años manteniendo su flujo magnético a temperaturas de hasta 300°C, que ya es una temperatura de carbonización, presenta una gran estabilidad respecto a las vibraciones, sin embargo puede perder energía si se expone a la influencia de un electroimán ó teniendo un exceso de corriente en la armadura, (exceso a la corriente de diseño), cualquier fuerza magnética externa que exceda a la del imán le causará desmagnetización.

Un transitorio de un ciclo es causa parcial y suficiente para que el imán pierda campo magnético, pero tiene la propiedad de que se puede energizar exitandolo externamente.

Algunas características específicas de los motores de imán permanente, los hacen ideales para cierto tipo de aplicaciones, estas características son:

1. Ausencia de calentamiento del campo.
2. Línealidad en la característica par-corriente.
3. Intensidad constante de campo.
4. Regulación.
5. Baja inercia.

Estas características aplicadas adecuadamente pueden mejorar el funcionamiento, en función de la potencia-- en motores de velocidad constante.

Los motores de c.a., ó convencionales de c.c., son usualmente usados con estas características.

La aplicación de los motores de c.c. de imán-- permanente, en base a su característica de par, es posible ob tener ventajas en aplicaciones específicas.

1. Ausencia de calentamiento de campo, operando el motor en un encierro total, los incrementos normales -- del par, no sufren alteración para una capacidad específica-- no se generará calor en el campo, es significativo notar que en los motores convencionales el 40% del calentamiento se generará por los campos.

2. Línealidad en la característica par-corriente, las curvas de las fig.4.4.6., muestra las características de un motor de imán permanente, notese que mientras el motor convencional requiere un 200% de corriente, sólo el 180% de esa corriente es requerida por el motor de imán permanente, esta diferencia puede tener un efecto significativo en el valor eficaz y puede ser muy importante para la aceleración, -- sobretodo cuando aumenta la corriente.

3. Intensidad constante de campo, se puede --- usar para preveer caidas de carga, frenando dinámicamentr con el campo y con un dispositivo de regulación, se puede controlar la velocidad, sin excitación el motor conserva la intensidad de campo conlo que se puede controlar el frenado usando - el campo en dos pasos de frenado dinámico, el motor no desbo- cará.

4. Regulacion, estos motores de imán permanente tienen una regulación líneal, esto es la velocidad decrece línealmente con la carga permitiendo el uso de estos motores sin tener que usar un campo serie ó contactos revercibles, -- el motor convencional tiene una característica de velocidad, - ascendente por lo que no se puede usar sin reguladores, fig., 4.4.7.

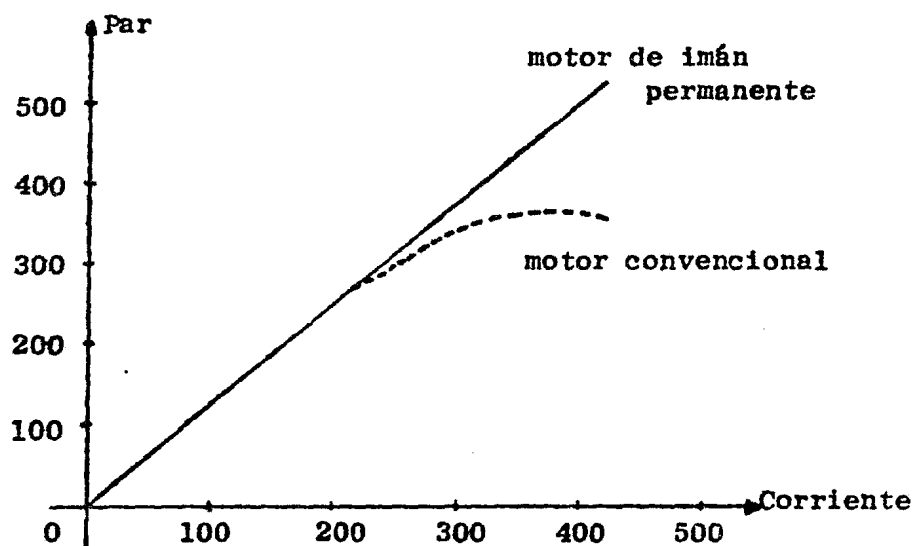


Fig.4.4.6. Curvas, características de par y corriente, para -
motores de imán permanente y convencional.

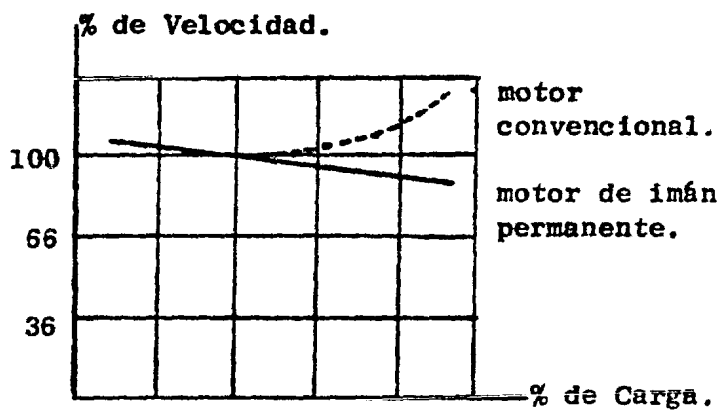


Fig.4.4.7. Curvas, características de velocidad en % respecto
a la carga, en motores de imán permanente y conven
cional.

5. Inercia, el motor de imán permanente, puede acelerar más rápidamente a corriente reducida, para evaluar este factor se establece un parámetro común estableciendo un tiempo fijo al acelerarlo con carga fija, se puede seleccionar un valor nominal para una carga inercial, pensando en un valor de 83 entre inercia y motor.

En muchas aplicaciones se ha encontrado que a 60% de la potencia requerida, es necesario acelerar el motor.

4.5 APLICACIONES .

Una de las aplicaciones importantes de los imanes permanentes, es en los motores de c.c., de armadura de disco, la armadura de disco se semeja a una aspa axial alamburada y encapsulada con material plástico y resina epoxica, como la fig.4.5.1., a diferencia de otras máquinas el flujo en las ranuras es axial ya que los conductores activos de la armadura están en posición radial respecto a la flecha en que está montada dicha armadura.

En 1967 se comenzó el diseño y desarrollo de este tipo de motor, de esa fecha en adelante se han diseñado prototipos, desarrollados para varias aplicaciones, una de --

estas aplicaciones es en la industria automotriz, en segadoras de césped són las primeras aplicaciones, con especificaciones de;

Potencia de 900 watts, velocidad de 2500 rpm, y voltaje de 12 volts, sí mismo se han hecho diseños aplicados en unidades motorizadas con especificaciones de;

Potencia de 1.86 watt, velocidad de 10,500 rpm y 36 volts, y una relación de engranes de 16:1, también se han hecho diseños para ventiladores y radiadores (enfriadores), con armadura de disco, con especificaciones de;

Potencia de 90 watt, 2730 rpm, y voltaje de 14 volts con una armadura de longitud axial de 30 mm.

Se han diseñado y construido de tal forma que tengan baja inercia para aceleraciones y desaceleraciones rápidas que son requeridas en la industria, éstas funciones se desarrollan debido a la densidad de flujo que proporciona el imán permanente.

La fig. 4.5.1, presenta un prototipo de este motor, el sistema de campo incluye 18 segmentos de imán permanente fijos en el hierro de la armadura con resina apoxi, el

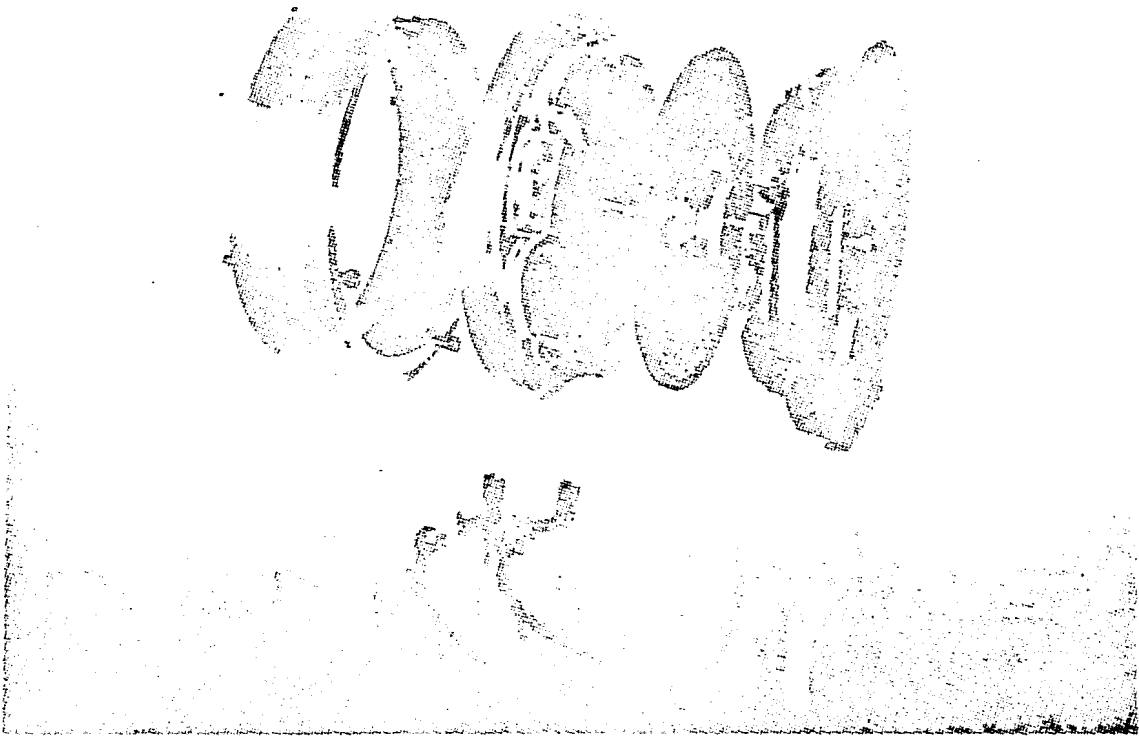


fig.4.5.1., Motor de Armadura de Baja Inercia.

imán permanente proporciona una elevada concentración de energía de campo, para magnétizarlo se enrollan vueltas con alambre de cobre al rededor de las piezas magnéticas.

La armadura tiene embobinado doble con capa duplex de 46 enrollados con siete vueltas por enrollado e impregnado con polyester y con cobre esmaltado (clase F), de 4 mm., de diámetro, el extremo del enrollado se conecta a la delga número 46 del conmutador y se encapsula a temperaturas elevadas, con técnicas de moldeo en resinas apóxicas, en el moldeo se obtiene la rigidez mecánica requerida.

Los debanados del rotor del motor de armadura de disco en motores de baja inercia, tienen una región activa de 1.5 mm, lo que asegura un buen deslizamiento así como el espacio entre la armadura y las caras del imán es de 2.5 mm, y el claro entre cada cara de los discos es de 0.6 mm.

La renura en la cara del imán determina la longitud axial necesaria para que el imán proporcione la cantidad de flujo requerido, usando el material Columax la longitud debere de ser 20 veces la longitud del claro. Es muy importante la longitud del claro en el diseño mecánico, para disminuir perdidas por fricción mecánica, la armadura deberá de

estar completamente cerrada.

4.6 RESULTADOS DE PRUEBAS.

La fig.4.6.1., muestra las características del estado estable de un motor en pleno funcionamiento, (motor en prueba), con un voltaje aplicado de 45 volts, estas características són típicas para un motor con armadura de disco, el par es directamente proporcional a la corriente de armadura-- la velocidad disminuirá al ir aumentando la carga, en su rango normal de operación da una eficiencia elevada.

FUNCIONAMIENTO TRANSITORIO.

Si representamos a la inercia como una rueda - acoplada a la flecha del motor y le aplicamos un voltaje de - 90 volts para que alcance una velocidad de 6000 rpm., despreciando la fricción e inductancia de armadura, la velocidad se rá:

$$S = S_m (1 - e^{-\frac{t}{T_m}}) \quad \text{XLV}$$

donde, S_m es la máxima velocidad y T_m , es la constante de tiempo del motor pero;

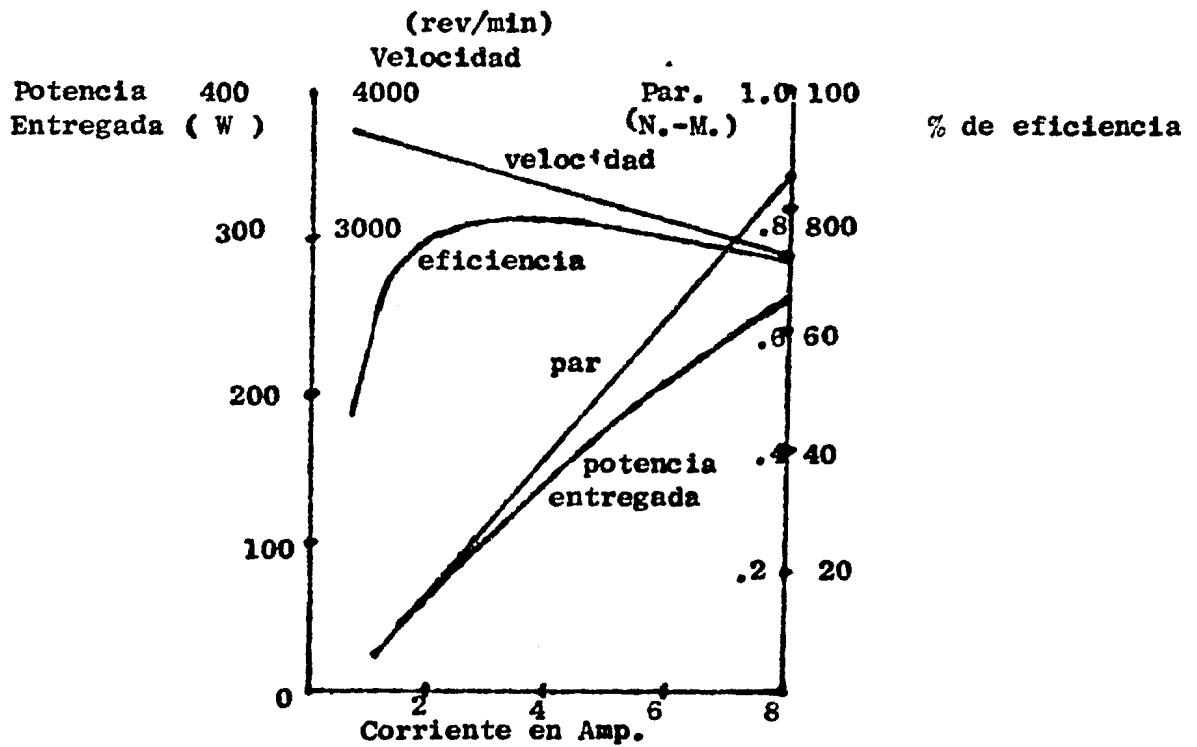


fig.4.6.1., Características de funcionamiento para un motor de c.c. de iman permanente de armadura de disco de baja Inercia.

$$T_m = \frac{J \cdot R_a}{K_m^2}$$

XLVI

donde,

J= momento de inercia del motor y carga.

R_a=resistencia de la armadura.

K_m=constante del motor en función de la característica, par-corriente.

Se a diseñado tambien para aplicaciones domésticas, usandose diodos rectificadores, para limpiavidrios estos con un conmutador universal los que proporcionan buena --
comutación, altas velocidades y facilidad para controlarla.

La fig.4.6.2., muestra un motor que tiene de --
salida las sig., características, 300 watts, velocidad de ---
17500 rev/min., suministrandole un voltaje de 240 volts de --
C.A., rectificando la senoidal principal.

En motores con baja inercia se usa imán permanente de Ferrita-Bario, los cuales sustitullen a las aleaciones metálicas, este tipo de imán permanente, tiene baja densidad de campo pero este es compensado por la alta capacidad de atracción, (coerción), lo que es un aspecto importante para--
los motores de armadura de disco que para una buena eficiencia
a se construyen con claros amplios.

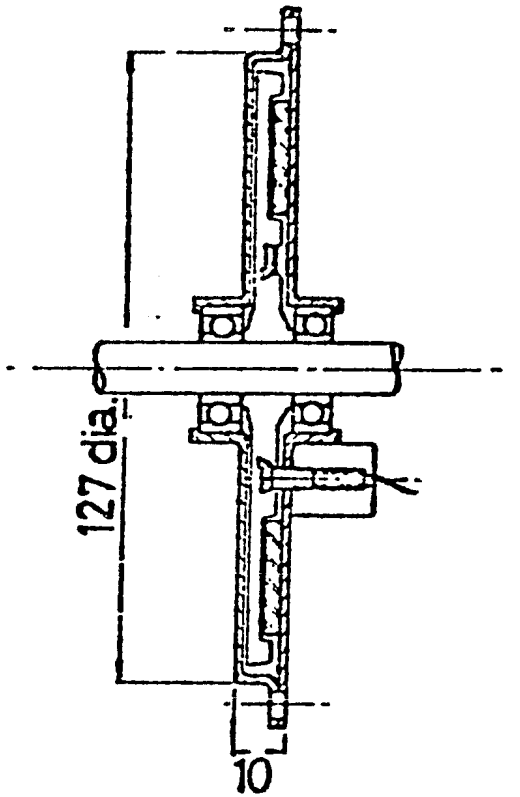


fig.4.6.2., Datos de Operación para un motor de c.c. de
Iman Permanente, de armadura de disco.
Potencia, 300 Watts.
Velocidad, 17500 rev/min.
Voltaje, 240 volts.
(dimensiones en mm)

Este tipo de imán permanente con que se construyen no requiere magnétizarse, es una de las características por lo que son económicos, son muy usados en accesorios para la industria automotriz, como motores para el enfriamiento de radiadores controlados por termostato los cuales son muy compactos uno de estos se muestra en la fig.4.6.3., con características de, 66 Watts de potencia, 4200 rpm de velocidad y 12 volts de entrada, se han diseñado también, para impulsar pequeños carros eléctricos así mismo se tienen proyectos en desarrollo para emplearlos en motocicletas.

PAR Y PERDIDAS EN ESCOBILLAS.

Las pérdidas en las escobillas en este tipo de máquinas de c.c., se mantienen en rangos despreciables con amplios rangos de velocidad, controlando la posición de la flecha de la armadura, el par se genera por un campo rotacional de c.c., que interacciona con el campo que induce la corriente de armadura, es posible llevarse a cabo una distribución rectangular de la f.e.m., de armadura prácticamente con una alimentación sin interrupciones.

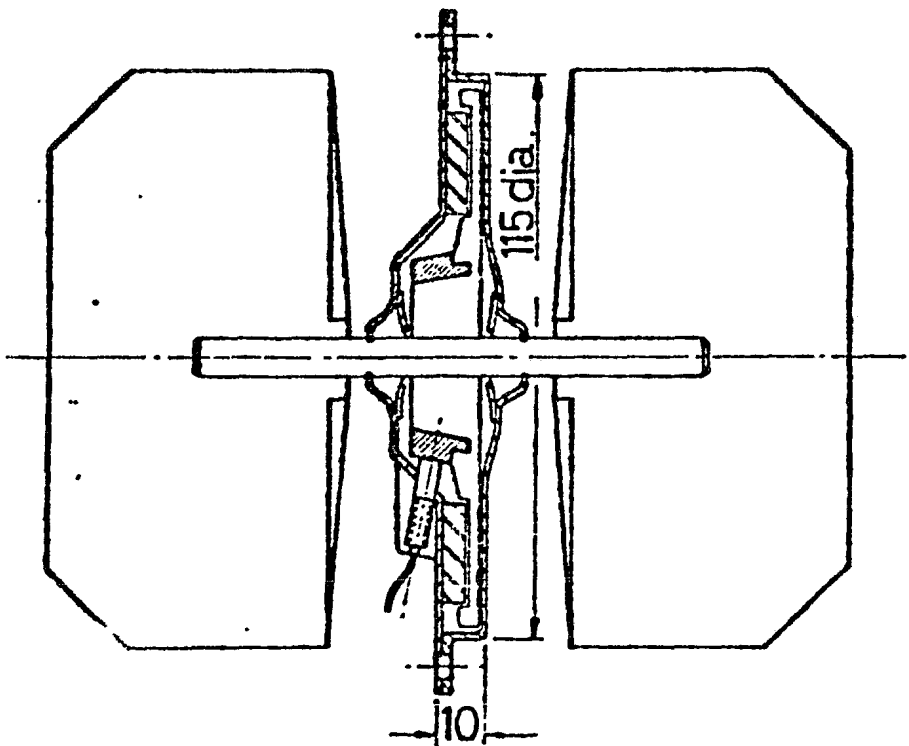


fig.4.6.3. Muestra un motor de c.c. de iman permanente usado con un impulsor gemelo en radiador de carro, con las sig. especificaciones, 12 volts,66 watts y 4200 rev/min. (dimensiones en mm).

Hay pequeñas desventajas pero tambien considerables beneficios, sobre todo en los costos de operaci3n y -- mantenimiento.

Tambien son dise~ados para usarse en sensores de posici3n y controladores, estos son operados en forma de - interrupciones (switches), continuo. Debido a este switcheo, - hace que la frecuencia de rotaci3n se salga un poco de la frecuencia normal debido a esto se hace presente una armonica en la corriente de armadura, la que tiende a cambiar el par esto se debe a la posici3n del rotor (armadura), pero este par oscilante es aceptable en algunas aplicaciones, se puede redu-- cir empleando rotores que trabajen con algun sistema de salto pero esto presenta desventajas en bajas velocidades, se usa - en aplicaciones de control donde la posici3n depende del cambio del par lo que equivale a cambiar la ganancia del motor - se pueden hacer dise~os apropiados a sistemas que tengan niveles bajos de par oscilante, teniendo un par elevado en el - rango de bajas velocidades.

5.- B I B L I O G R A F I A .

Autor; Siskind.

Título; Máquinas Eléctricas.

Capítulos; Nº 5, Características del Motor de C.C. Pag.134-182

Autor; Leander W. Matsch.

Título; Máquinas electromecánicas y electromagnéticas.

Capítulos; Nº 4, Máquinas de C.D. Pag. 135-242.

Autor; R. Lynch.

Revista; Pequeñas Máquinas Eléctricas

Edición; Nº 136.

Fecha; Marzo, 31/1976.

Artículo; Desarrollo de Servomotores de C.C., de Imán Permanente de Cobalto-Samarium.

Autor; A. E. Corbett, y M. T. Mohammad.

Revista; Pequeñas Máquinas Eléctricas.

Edición; Nº 136.

Fecha; Marzo, 31/1976.

Artículo; Motor de Armadura de Disco y sus Aplicaciones.