



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA
DE IMAN PERMANENTE**

T E S I S

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

**P R E S E N T A:
JOSE FRANCISCO MANRIQUEZ QUEZADA**

**DIRECTORES:
ING. RENE LARA SANCHEZ
ING. AGUSTIN RODRIGUEZ FUENTES**

México, D. F.

1984



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.

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

- ϕ Angulo entre los fasores F y F_a
- $\delta = E - U$ Caída de voltaje en las escobillas.
- a, b Coeficientes de fricción.
- K Constante de la máquina.
- K_e Constante de la máquina.
- T_m Constante de tiempo en mseg.
- I_a Corriente de armadura en amperes.
- I_f Corriente de campo en amperes.
- I_l Corriente de línea en amperes.
- B Densidad de flujo magnético en Maxwell/cm².
- F Fasor representativo de la f.m.m., de campo.
- F_a Fasor representativo de la f.m.m., de armadura.
- ϕ Flujo magnético (líneas de flujo), en los polos.
- E Fuerza contraelectromotriz inducida en la armadura en volts.
- l Longitud de los conductores en cm.
- P.M. Máquina de imán permanente.
- E.M. Máquina de electroimán.
- J Momento de inercia.
- N Número de conductores.

2a.	Número de trayectorias en paralelo de la corriente.
P	Número de polos en el campo.
λ_m	Par desarrollado por el motor.
λ_r	Par resistivo en la flecha del rotor.
\mathcal{E}	Reacción de la armadura en volts.
F_d	Reacción de armadura desmagnetizante.
F_q	Reacción de armadura magnetizante.
R_a	Resistencia de armadura en ohms.
L	Inductancia en milihenrris.
R	Fasor resultante representativo de la f.e.m.
ω	Velocidad angular en rad/seg.
U	Voltaje de entrada a la máquina en volts.
V	Voltaje de línea en volts.

Todas la unidades son referidas al sistema, MKS.

I N D I C E

- 1: -Introducción.
- 2: -Consideraciones generales (pag.5).
- 2:1 -Principios de operación (pag.5).
- 2:2 -Circuito eléctrico de un motor de c.c. (pag.5).
- 2:3 -Embobinado de armadura para las máquinas de c.c. (pag.17)
- 2:4 -Circuito magnetico (pag.18).
- 2:5 -Conexiones de campo en máquinas de c.c. (pag.25).
- 2:6 -Curvas características (pag.29).
- 3: -Comparación de modelos matemáticos para motores de electro imán y de imán permanente, de c.c. (pag.39).
- 3:1 -Voltaje constante (pag.40).
- 3:2 -Caída de voltaje (pag.41)
- 3:3 -Análisis de la reacción de armadura (pag.44).
- 3:4 -Inductancia de armadura (pag.48).
- 3:5 -Parámetros mecánicos (pag.50).
- 3:6 -Ecuación general (pag.53).
- 3:7 -Modelo líneal a tramos (pag.55).
- 3:8 -Función de transferencia (pag.59).
- 3:9 -Diagrama de bloques y simulación análogica (pag.61).

3:10-Comparación de los modelos (pag.64).

3:11-Conclusiones (pag.68).

4: -Aplicaciones (pag.73).

4:1 -Desarrollo del motor de c.c., de imán permanente de cobalto-samarium. (pag.73).

4:2 -Características magnéticas (pag.75).

4:3 -Diseño del motor (pag.80).

4:4 -Desarrollo del motor (pag.82).

4:5 -Aplicaciones (pag.94).

4:6 -Resultados de pruebas (pag.98).

5: -Bibliografía (pag.105).

I. INTRODUCCION.

El tema de esta tesis es, el de los motores de corriente continua de imán permanente, haciendose una breve y general descripción de los aspectos más importantes de este tipo de máquinas giratorias, mismas que vuelven a ser importantes gracias a su empleo en sistemas de control y a los avances en dispositivos de rectificación AC/DC, de estado sólido. Debido a la limitación de la intensidad de campo que imponen los imanes permanentes, el tamaño de un motor de c.c., de imán permanente es a la fecha menor de 100 H.P.

Así mismo, se hace una descripción general de las características de la máquina de c.c., comenzando por el circuito magnético y circuito eléctrico, continuando con la forma en que se concatenan los campos del estator y del rotor se resaltan las características de par, velocidad, corriente y potencia.

Los diferentes embobinados, imbricado y ondu--

lado con los cuales se construyen las armaduras del rotor, - así como las formas de acomodo para estos embobinados, las - formas de excitación, serie, derivación y compuesto para el campo, ya que de acuerdo a estas formas de excitación, están dadas las características de par, corriente y velocidad de - una máquina de C.C

Se hace un análisis comparativo de las características del par, velocidad y corriente para las tres formas de excitación del motor de C.C. de electro imán. Se presenta también una comparación del motor de C.C. imán permanente con respecto al motor de C.C., de electro imán, haciendo esta comparación en función de las ecuaciones representativas las que describen las características ya mencionadas, - resaltando lógicamente las características de la máquina de imán permanente.

Se presenta un análisis de la respuesta transitoria para el motor de imán permanente, así como el diagrama de bloques de su función de transferencia.

Un imán permanente no requiere ser energizado

pero tienen la característica de que si a perdido parte de su intensidad de campo, puede volver a recobrar esta característica magnetizándolo. Se han desarrollado algunas aleaciones con materiales magnéticos, las cuales presentan características magnéticas superiores a las de los elementos base de la aleación. Una de las características principales es la de no perder el campo magnético con el paso del tiempo, otra es la de soportar temperaturas muy elevadas y de tener un -- producto de energía BXH, muy favorable para usarse en las máquinas de C.C.

Se hace una descripción de los pasos a seguir para hacer diseños de motores con imanes permanentes, lo que no es complicado, haciendo una separación de las partes que lo integran, el circuito magnético que se diseña con el imán permanente no es complicado ya que el volumen de material necesario que proporcione la densidad del flujo requerido, el cual es llamado producto de energía en base al cual se hace el diseño para un motor con ciertas características de par y velocidad que se requieran.

El diseño se debe hacer de tal forma que el i

mán ocupe el volúmen que ocuparía el embobinado de un electroimán, para conformar los polos del campo en el interior de la carcaza, sin que cause problemas mecánicos, maquinándolo de la forma más conveniente.

El diseño correspondiente al circuito eléctrico de la armadura, es el mismo que el correspondiente a un motor normal de C.C. Las aplicaciones del motor de C.C. de imán permanente, se han diversificado extendiéndose paulatinamente debido a las ventajas en las características de la máquina, así como sus ventajas económicas y de manufactura, por lo cual a desplazado a otras máquinas.

Se da una descripción de las características magnéticas de las diferentes aleaciones que se han obtenido a la fecha, siendo estas características superiores a las de los elementos que las integran, los imanes permanentes de cerámica son los más ampliamente usados en los servomotores para el movimiento de servomecanismos, así mismo, el producto de energía (BXH) de los imanes permanentes es muy elevado.

Se describen algunos tipos de armaduras con --

que se han venido construyendo los motores de imán permanente siendo las de forma cilíndrica y de disco las más usadas e importantes, debido a estos tipos de armaduras se desarrolla la estructura del motor en forma conveniente. Se citan aplicaciones específicas, desde el aspecto industrial, de instrumentación, servicio doméstico y algunas otras aplicaciones.

Se hacen análisis de los diferentes tipos de respuestas, debidas a los transitorios que se presentan en la respuesta de un motor de c.c., de imán permanente. En base a la función de transferencia se hace una descripción de los diagramas de alambrado para la simulación del comportamiento en una computadora análogica la cual es un instrumento eficaz para analizar las respuestas del comportamiento del motor, con las cuales tambien se puede obtener gráficas de dicho comportamiento, tambien se hace mención de la aplicación de las computadoras digitales, con las que se puede hacer tambien el análisis y diseño de un motor, en base a programas específicos, estas herramientas son muy útiles ya que proporcionan respuestas rápidas y precisas.

2. CONSIDERACIONES GENERALES.

2.1 PRINCIPIOS DE OPERACION.

Una máquina electromagnética, trabaja interactuando un campo magnético con un circuito eléctrico, el primero es generalmente producido por un electro-imán. Al pasar corriente por un conductor colocado en un campo magnético, se produce en este una fuerza que puede mover al conductor y al estar en movimiento se induce en el una fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.), En el principio anterior se basa el funcionamiento de las máquinas de corriente continua, tanto el motor como el generador, la única diferencia entre los dos, es que el giro de la armadura del generador es en el sentido de las manecillas del reloj y en el motor es contrario a las manecillas del reloj.

2.2 CIRCUITO ELECTRICO DE UN MOTOR DE C.C.

Consiste de lo siguiente; una fuente de voltaje que hace circular corriente por los conductores de la arma

dura, venciendo la inercia y fricción, por la interacción del campo magnético de los polos y el campo de los conductores de los embobinados de armadura, el embobinado de armadura contiene un determinado número de bobinas idénticas colocadas en ranuras, uniformemente distribuidas en la periferie de la armadura laminada, generalmente con laminaciones de áceró de 0.04 centimétros de espesor. Las bobinas estan interconectadas a través de un conmutador ya que és necesario conmutar la corriente para mantener unidireccional el sentido del par. El conmutador contiene un determinado número de delgas (segmentos del conmutador), aisladas entre sí, el conmutador gira con la armadura, los polos del campo se construyen con sección transversal rectangular y láminas de áceró de 0.06 centimétros de espesor, esta construcción con láminas mantiene al mínimo las corrientes párasitas.

Los polos del campo se sujetan al yunque (yunque, piezas polares, entrehierro y armadura, forman el circuito magnético), el campo magnético es producido por las bobinas montadas en las piezas polares, el número de polos de una máquina de c.c., debe ser proporcional al valor nominal del voltaje dado por la ecuación;

$$E = \frac{Z \cdot \Phi \cdot \omega \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot a} , \text{ donde;}$$

E=voltaje inducido en volts.
 Z=2N_a=número de conductores.
 N_a=número de vueltas en el embobinado de armadura.
 Φ=flujo magnético por polo en webers
 P=número de polos.
 ω=velocidad angular en rad/seg.
 a=número de trayectorias de corriente en la armadura.

2.3 EMOBINADO DE ARMADURA EN MAQUINAS DE C.C.

Este embobinado generalmente se construye de cobre, colocandose en las ranuras del rotor y conectado a los segmentos del conmutador, el número de segmentos sera igual al número de bobinas de la armadura, generalmente hay dos tipos de embobinados para las armaduras de c.c; Imbricado y Ondulado, estos se pueden arreglar en formas; Simplex y Múltiplex, los embobinados múltiplex estan formados por circuitos Simplex en paralelo, el embobinado Simplex tiene tantas trayectorias de corriente como número de polos en el campo, a=P, el embobinado Ondulado Simplex tiene sólo dos trayectorias de corriente a=2, se puede combinar un embobinado Imbricado con un embobinado Ondulado, a esta combinación se le conce 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 hp, debido a lo económico de esta, no así en máquinas de bajo voltaje y altas corrientes. Para una velocidad dada, el número de vueltas en el embobinado de la armadura requiere de un embobinado Ondulado, 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 conductores, 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 transversal más gruesa y un número menor de vueltas así mismo el espacio requerido para el aislante que está entre las vueltas en la bobina también es menor, esto facilita la transferencia de calor lejos de los conductores del embobinado.

Un embobinado Ondulado con una sección transversal grande, también puede presentar dificultades mecánicas en la máquina con bajos voltajes y altas corrientes, la solución a esto sería un embobinado tipo Imbricado con más número de vueltas y sección transversal pequeña lo cual es más práctico.

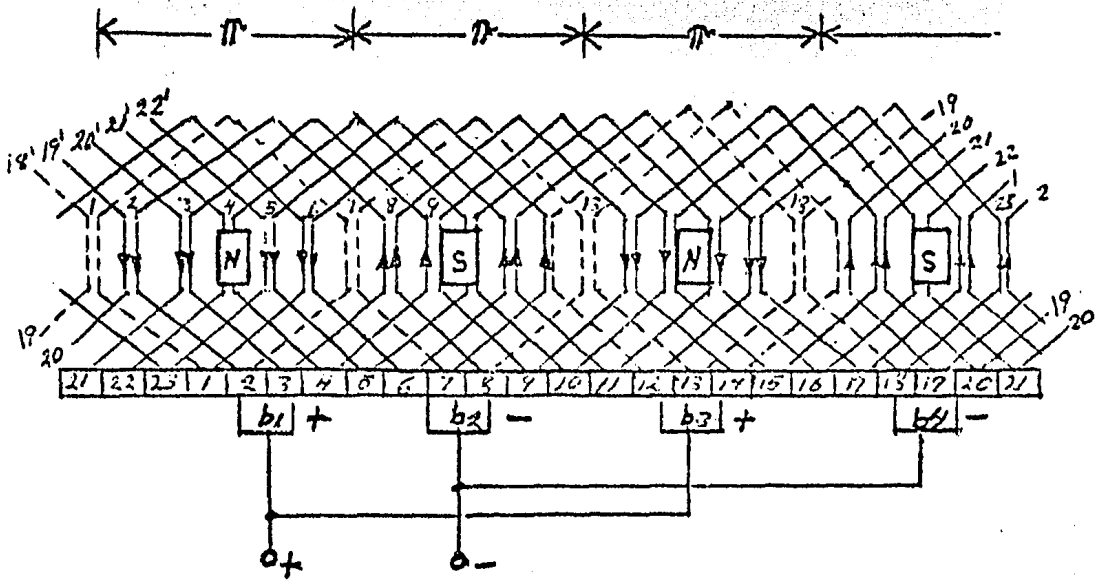


Fig.2.3.1., Desarrollo de un embobinado tipo Imbricado de cuatro polos.

La fig. 2.3.1., muestra el desarrollo de un em bobinado imbricado, que contiene 23 bobinas de una vuelta cada bobina y cuatro escobillas que deslizan respecto al conmutador que tiene 23 segmentos, el traslape entre las bobinas - adyacentes ó imbricadas es lo que da el nombre al embobinado.

El embobinado imbricado simplex de 4 polos tie- ne 4 trayectorias de corriente, $a \neq 4$ por esto requiere de 4 es cobillas. Al recorrer el embobinado de una escobilla a otra - de polaridad opuesta, un cuarto del ambobinado, se encuentra - torcido lo que muestra las cuatro trayectorias de corriente - habrá tantas trayectorias como polos en el embobinado imbricado.

Una bobina de armadura termina en las delgas - adyacentes del conmutador respecto a la que comienza, la posi ción del centro de cada polo del campo se indica con, N y S - polaridad norte y sur respectivamente, si las escobillas son - más anchas que un segmento del conmutador, tendran más área - de contacto por lo que abarcaran más segmentos evitando el -- chisporroteo de voltaje, las bobinas punteadas están en corto circuito por las escobillas, los lados de las bobinas en cor - to circuito son equidistantes con respecto a 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,

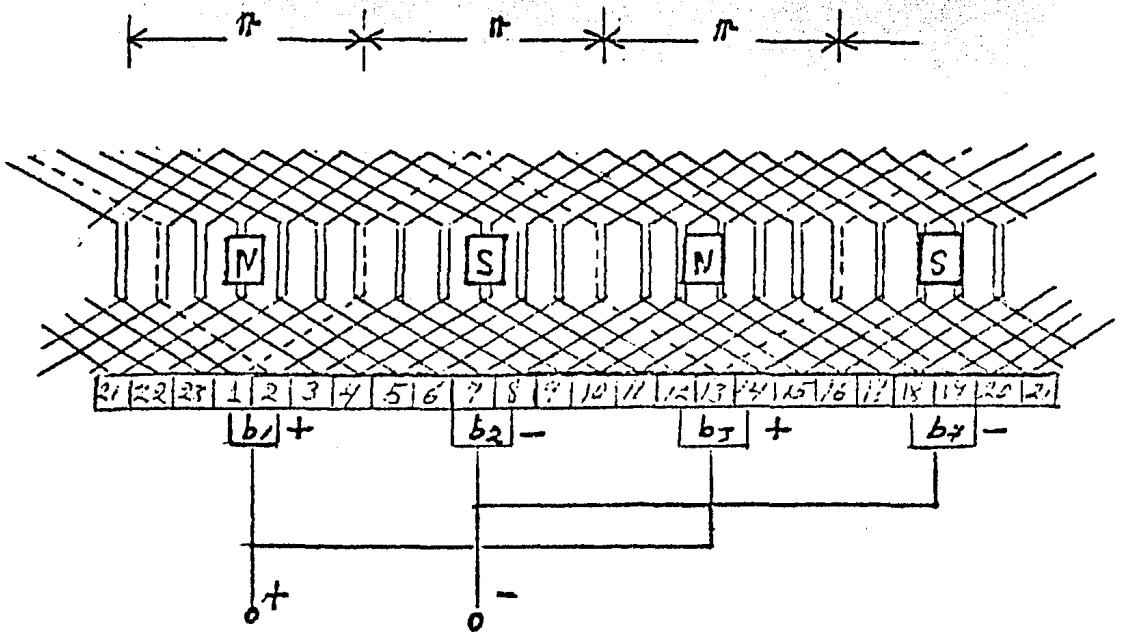


fig.2.3.2., Desarrollo de un embobinado tipo Ondulado de cuatro polos.

la fig.2.3.2., 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 traslapando a las delgas, el nombre de Ondulado se debe a la apariencia de una onda a la cual se parece la bobina de una vuelta.

Al recorrer uno de los embobinados desde una -
escobilla a otra de polaridad opuesta, encontramos que la mi-
tad del embobinado y una mitad de los segmentos del conmuta--
dor estan encontrados, así mismo sólo hay dos trayectorias pa
ra la corriente en este tipo de embobinado sin tomar en cuen-
ta el número de polos, prácticamente el embobinado Ondulado -
requiere sólo de dos escobillas, son suficientes para máqui--
nas pequeñas. Generalmente se usa el mismo número de escobi -
llas que de polos, para proporcionar una área de contacto ade
cuada para un conmutador pequeño, una bobina de armadura con-
embobinado Ondulado terminará en una delga dos pasos polares-
adelante de donde comienza.

La reacción de armadura, f.c.e.m., y componen-
tes del flujo, que se presentan en condiciones de carga en un
motor, estan en función de la corriente de armadura y a la di
rección de esta corriente, esta corriente se puede determinar
por la posición de las escobillas como se muestra en la fig.2
3.3.(a), así mismo se muestra un diagrama fasorial de esta en
la fig.2.3.3.(b), su dirección es perpendicular a la de los -
polos produciendo un campo resultante que esta desplazado res
pecto al que se produce en vacio (sin carga).

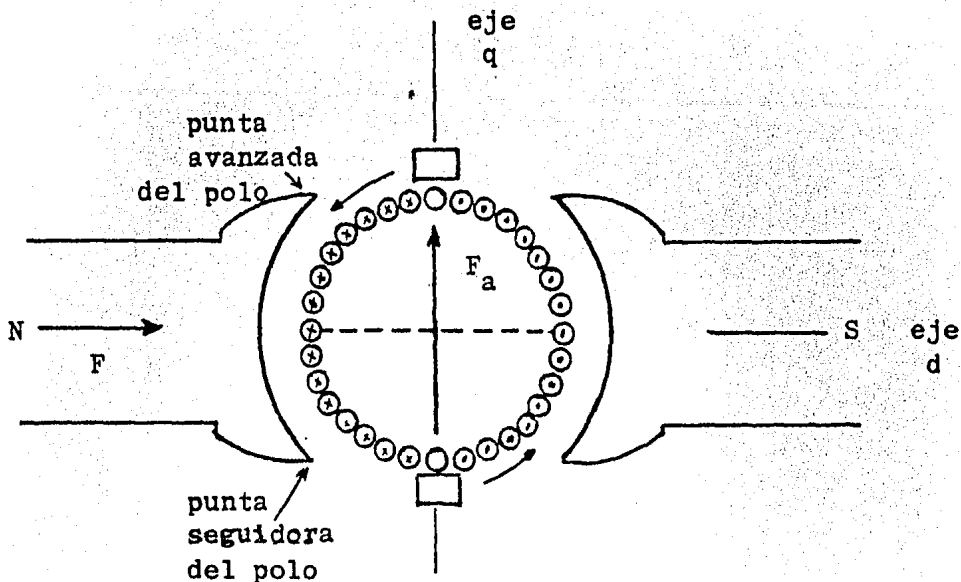


Fig.2.3.3.(a), Representación grafica de un motor de dos - polos, con las escobillas en el neutro geométrico

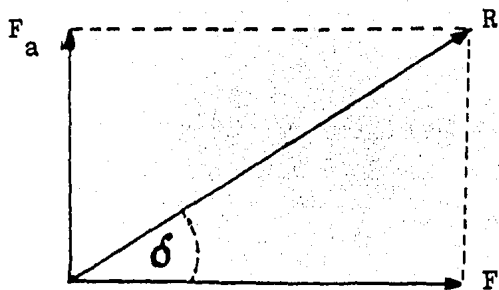


Fig.2.3.3.(b), Diagrama fasorial de las componentes de la-f.e.m., resultante.

La corriente de armadura produce una f.m.m. F_a vertical hacia arriba, formando un ángulo recto con el eje de los polos, así mismo el campo genera una f.m.m. F , horizontal la suma vectorial de las dos f.m.m's., dan una f.e.m. R , resultante, dirigida al extremo superior del polo en el sentido del movimiento, en consecuencia el plano neutro experimentará un giro hacia atrás, perpendicular al vector resultante, si no se presentara esta f.e.m., el eje de las escobillas coincidiría con el plano neutro. Para contrarrestar este efecto se usan dos métodos, el primero consiste en situar las escobillas detrás del plano neutro, al aumentar la carga y en modo generador se avanzan, tanto en el motor como en el generador se deben colocar las escobillas fuera del plano neutro de carga para contrarrestar la f.e.m. El retraso de las escobillas produce una desmagnetización, F_d , es el vector del campo desmagnetizante y F_c , es la componente de magnetización. El segundo método consiste en poner embobinados conectados en serie con la armadura llamados interpolos, para reforzar el campo con lo que se produce un efecto magnetizante opuesto al de la armadura, entonces la f.e.m., de armadura estará dirigida sobre el eje en cuadratura. La fig.2.3.4.(a), muestra los fasores F_a y F , de los campos que producen el fasor R .

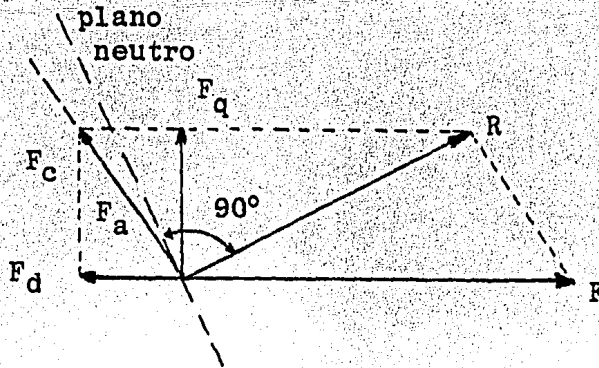


Fig.2.3.4.(a), Diagrama de fasores de las componentes fundamentales de las f.m.m.'s, inducidas.

Operando la máquina como generador la dirección de la f.e.m., resultante se mantiene fija, las escobillas se colocan en el neutro eléctrico avanzando a través del ángulo δ , adelante del neutro geométrico en la dirección de rotación para el generador, así mismo operando la máquina como motor con la misma corriente de campo y la rotación sin alterarse, la corriente de armadura estará en la dirección que muestra la fig.2.3.3.(a), el fvector R, de la f.e.m., de campo tiene la dirección dada por el ángulo δ .

Entonces el neutro eléctrico del motor ésta des-
plazado del neutro geométrico, en contra de la dirección de -
rotación ya que la f.e.m, de armadura se avanza o retrasa por
el ángulo δ , se podría decir que en ninguna posición en que -
se colocaran las escobillas podría alcanzarse esto, pero de-
bido a la acumulación del flujo en el último punto del polo -
del campo de un generador y en el extremo de la cabeza del po-
lo para un motor, ésto causa que estas regiones de los polos-
del campo se saturen, de forma que el desplazamiento posteri-
or de las escobillas no aumenta significativamente el ángulo-
 δ , 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 compo-
nente de la f.e.m., de armadura en el eje directo, esto se mu-
estra en la fig.2.3.4.(b), los conductores de la armadura in-
cluidos en el rango 2α , dan lugar a la reacción de armadura-
desmagnetizante (F_d), y los conductores de la armadura que --
están en el rango $\pi-2\alpha$, producen una reacción de armadura --
magnetizante cruzada (F_q).

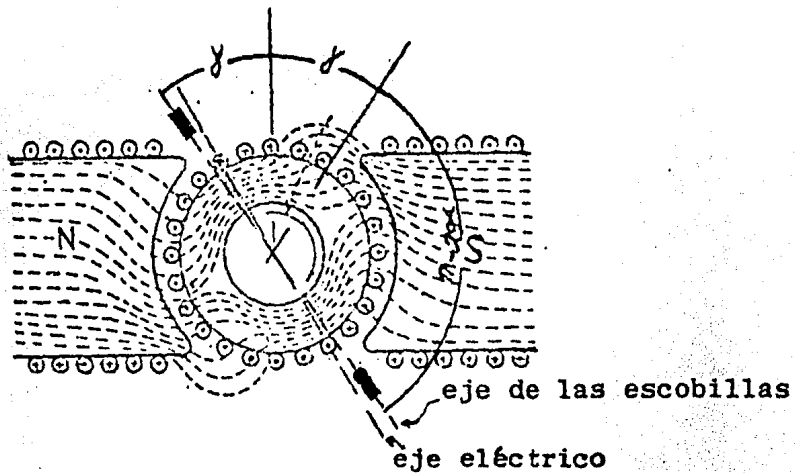


Fig.2.3.4.(b), Diagrama de un motor de dos polos, con las escobillas adelantadas del neutro geométrico.

Los amperes vuelta de la magnetización cruzada causa una distorsión en el campo, por lo que la saturación da origen al efecto de magnetización ó de desmagnetización, los diagramas de fasores son validos para las máquinas de dos polos, se pueden aplicar a máquinas multipolares, sí el ángulo-macánico se convierte en ángulo eléctrico por el factor $P/2\alpha$, siendo p , el número de polos, un cierto valor de desplazamiento de las escobillas en una dirección es correcta para una razón de la corriente de armadura, respecto a la corriente de campo, cuando la variación de la saturación magnética se desprecia.

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.

2.4 CIRCUITO MAGNETICO.

El motor desarrolla un par, por medio de el tiende a girar la armadura, este par lo integran fuerzas inducidas equidistantes, paralelas y opuestas entre sí, una máquina de c.c., presenta tres características;

1. 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 magnetico).
3. fuerza o par producido por la interacción de los dos puntos anteriores. Los fasores representativos de cada uno de los puntos anteriores, son perpendiculares entre sí.

Veamos primero, si una corriente se orienta en un campo magnético no uniforme, la densidad del flujo será mayor en un lado del conductor que en el lado opuesto, esté conductor experimentará una fuerza en el lado donde no hay con--centración de campo magnético como muestra la fig.2.4.1.(a).

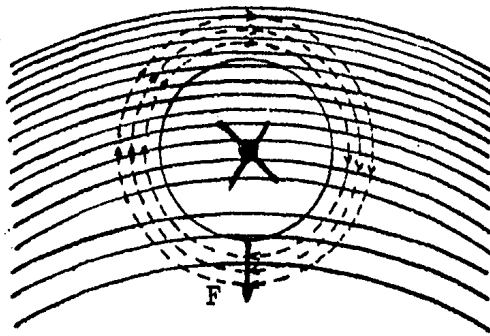


Fig.2.4.1.(a), Conductor expuesto a un campo magnético no uniforme por el cual circula una corriente hacia adentro, este experimenta un empuje.

Si el conductor no porta corriente y se coloca en un campo magnético uniforme no sucedera nada, como muestra

la fig.2.4.1.(b).

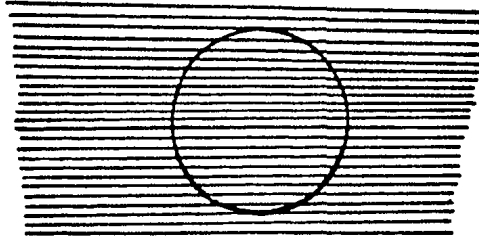


Fig.2.4.1.b, Conductor sin corriente, expuesto en un campo magnético uniforme.

Un par de conductores situados diamétralmente- en las ranuras de la armadura sobre la cabeza de los polos de una máquina de dos polos, al energizar el campo la distribucion

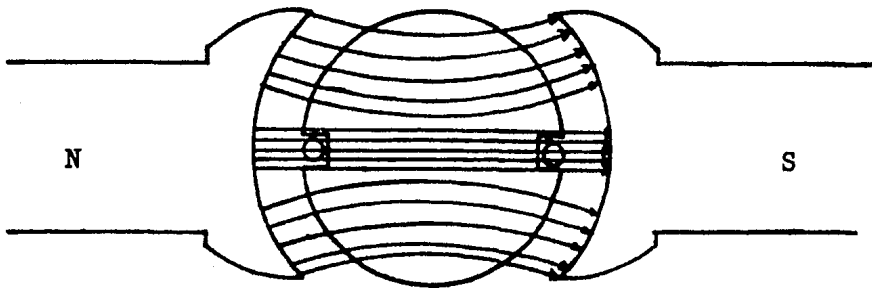


Fig.2.4.2, Campo magnético producido por los polos electromagnéticos.

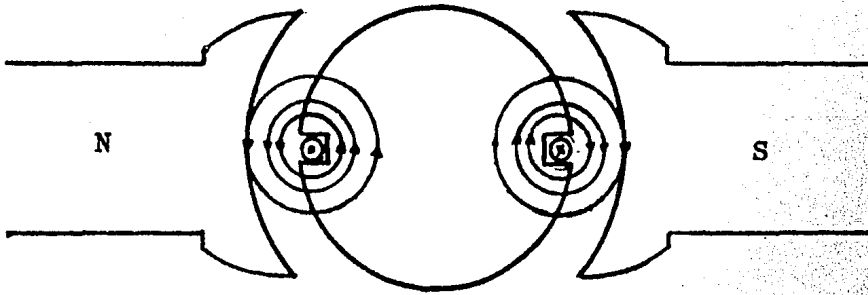


Fig.2.4.3., Campo magnético inducido en conductores en los que fluye una corriente.

ón del flujo es completamente uniforme y simétrico como se mu
 estra en la fig.2.4.2., sí los conductores (bobinas), portan-
 una cierta cantidad de corriente, está inducida en torno a --
 ellos un campo magnético circular como se muestra en la fig.2
 .4.3., cuya dirección se rige por la regla de la mano derecha
 la cual se enuncia como sigue; Ponemos el conductor en la ma-
 no derecha, que el dedo pulgar señale la dirección de la co--
 rriente y los dedos restantes señalaran la dirección de las -
 líneas del flujo inducido, entonces la dirección del campo ma
 gnético inducido en un conductor por el que fluye una corrien-
 te será de trayectoria circular y concentrica al eje del con-

ductor y esta en un plano perpendicular a dicho eje, si se invierte el sentido de la corriente, se invertirá el sentido del campo magnético inducido. Otra regla nos dice que la dirección de la corriente y la del campo magnético inducido están en igual relación que la dirección de un sacacorchos al hacer que este gire.

Cuando se excita el campo y la corriente fluye en los conductores de los embobinados de la armadura, habrá un campo resultante debido a la concatenación de los dos campos, la distribución del flujo resultante 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 muestra la fig.2.4.4.

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

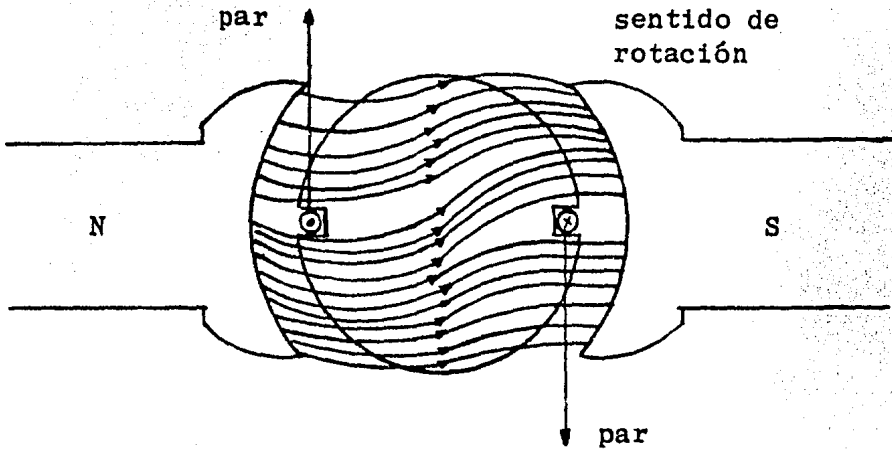


Fig.2.4.4. Que muestra la concatenación del campo principal - con el campo inducido en los conductores, así como la fuerza ó par resultante en los conductores.

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, está es que el conductor izquierdo portaría la corriente hacia adentro de frente al observador y el conductor derecho la portara 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 sea invertir el polo norte por el polo sur, también tendera la armadura a girar en sentido contrario al de las manecillas del reloj, entonces la dirección de rotación de la armadura de un motor de c.c., ésta 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 la corriente en la armadura, si se cambiaran las dos al mismo tiempo.

2.5 CONEXIONES DEL CAMPO EN MAQUINAS DE C.C.

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

- a) Excitación Independiente.
- b) Excitación en derivación o shunt.
- c) Excitación en serie
- d) Excitación compuesta, acumulativo y diferencial.

Esta clasificación se hace debido a la conexión del circuito del campo, relativo al circuito de armadura - las fig.2.5.1.(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 independiente.

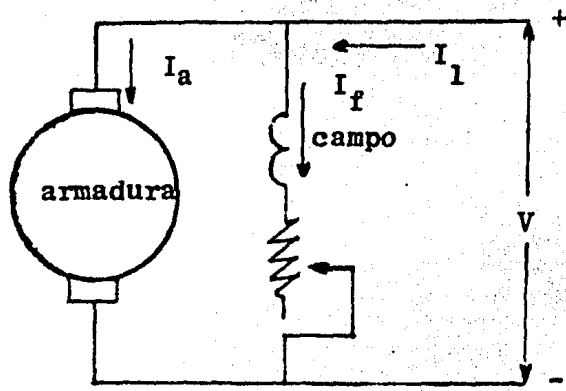


Fig.2.5.1.(a), Conexión en derivación para un motor, con excitación propia.

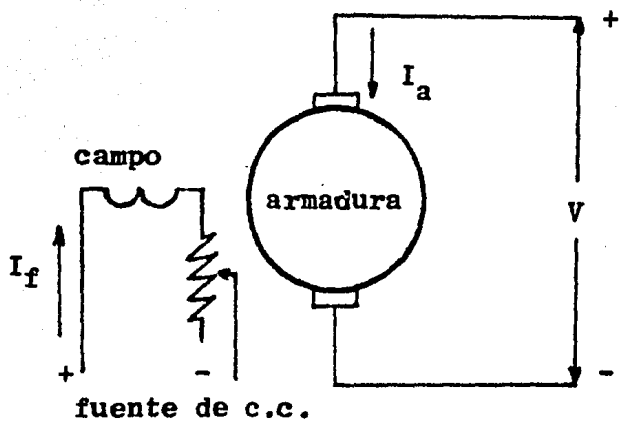


Fig.2.5.1.(b), Conexión en derivación para un motor, con excitación independiente.

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.2.5.2.,2.5.3., el mo--
 tor compuesto se puede conectar en derivación larga ó en deri-
 vación corta, que incluye embobinados de polos conmutadores--
 fig.2.5.4.

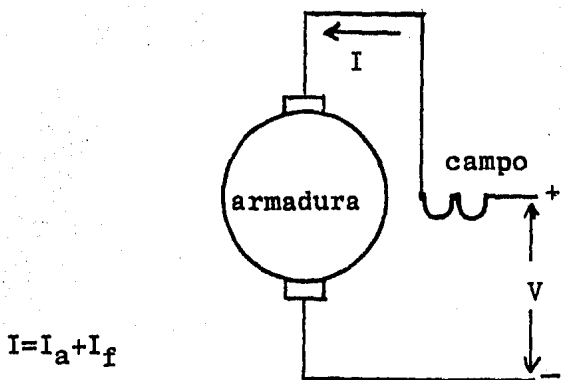


Fig.2.5.2. Conexión en serie para un motor, excitación serie

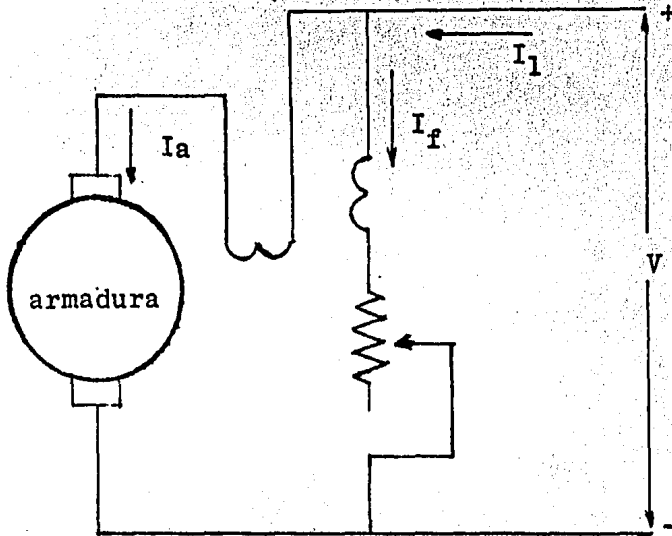


Fig.2.5.3., Conexión compuesta para un motor, con excitación propia.

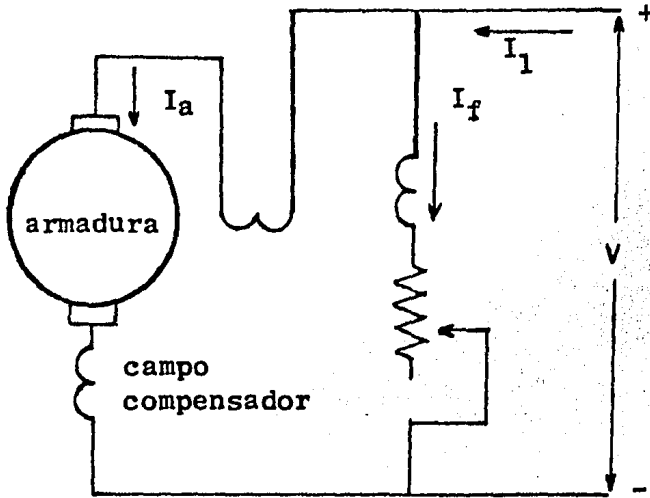


Fig.2.5.4., Conexión compuesta para un motor, con campos compensadores y campo serie.

2.6 CURVAS CARACTERISTICAS.

Fuerza y par desarrollado por el motor de c.c. debido a la acción de una fuerza ejercida sobre el conductor por el cual circula una corriente el cual se encuentra situado en un campo magnético, depende principalmente de;

1. la intensidad en el campo principal.
2. la densidad de corriente a través del conductor.

Se puede demostrar experimentalmente que un -- conductor de un metro de longitud, que porta un ampère de corriente ejercerá sobre el 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;

$$F = B \cdot I_a \cdot l \quad \text{Newtons.}$$

donde:

F= fuerza desarrollada sobre el conductor.
 B= densidad de flujo en el campo principal.
 I_a = corriente en el embobinado de armadura.
 l= longitud del conductor del embobinado de la armadura.

entonces el par es independiente de la velocidad de rotación y se puede expresar por la ecuación;

$$T = K \cdot \phi \cdot I_a \quad \text{Kg-M.}$$

donde:

T= par desarrollado por los conductores.
 ϕ = flujo por polo en Maxwell.
 I_a = corriente en el embobinado de armadura.
 K= constante de la máquina.

La corriente de armadura a través del campo se
rie varia al variar la carga, a cambios bruscos en la carga -
 habrá cambios bruscos en el flujo de la corriente de armadura
 el par de un motor en derivación depende sólo de la corriente
 de armadura, asumiendo que la corriente del campo en derivaci
 ón es constante, por el ajuste del reóstato de campo, como mu
 estra la fig.2.6.1.

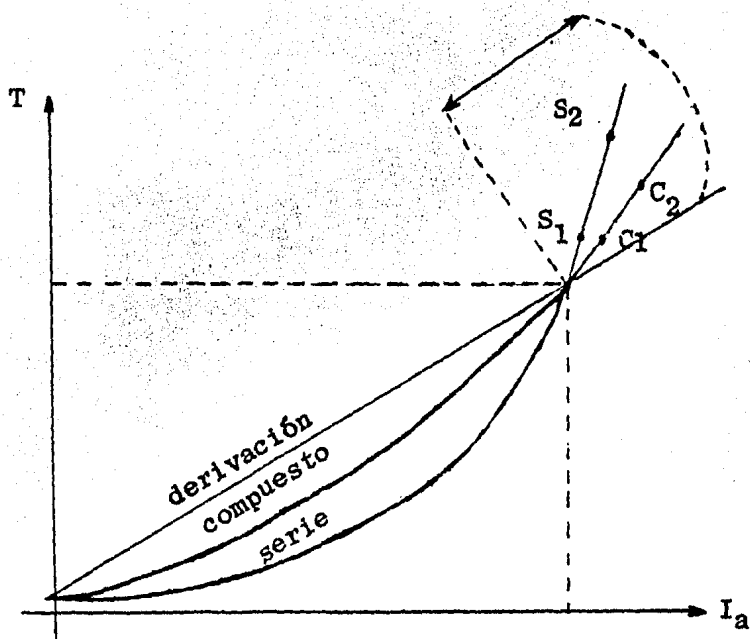


Fig.2.6.1., Curvas de valor del par, para los tres tipos de excitación.

Para propósitos de comparación, las curvas se prolongan para los tres tipos de motor, con el mismo par a plena carga y para un mismo valor de corriente de armadura, en la fig. 2.6.1. se muestran las curvas de las conexiones para un motor con carga y sin carga, se observa que el par mayor es desarrollado por el motor derivación y el par menor lo desarrolla el motor serie. En el rango de la corriente de armadura se observa la diferencia entre el motor serie y el motor compuesto, tienen curvas lineales 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 bastante alto en comparación al que desarrolla un motor derivación, la recta del motor compuesto cae en medio de las dos anteriores.

En la práctica es generalmente conocido que el motor serie tiene la capacidad para desarrollar en tales condiciones pares elevados. El par desarrollado por un motor al inicio de su operación se llama par de arranque.

Algunas aplicaciones de este tipo de motor son en trituradoras, bombas centrífugas y ventiladores.

El par desarrollado por un motor en el instante de arrancar vence la inercia de la máquina y fricciones de esta, por lo que usualmente se asigna un par de arranque de un cierto porcentaje del par a plena carga, de modo que un motor serie debe tener un par de arranque de 500% de su par a plena carga, un motor compuesto debe tener un par de arranque de 250% de su par a plena carga y un motor derivación tendrá un par de 125% de su par a plena carga, en estos casos el porcentaje del par tiende a normalizar a la velocidad y así poder manejar cargas nominales a plena capacidad del motor.

Haciendo un resumen de la velocidad de salida para los tres tipos más comunes de excitación de los motores al remover su carga;

- 1- la velocidad del motor excitación derivación se eleva del 2% al 8%, cuando se remueve completamente su carga.
- 2- la velocidad del motor excitación compuesto se eleva aproximadamente del 10% al 25%, al remover completamente su carga

3. la velocidad de un motor serie, se eleva muy rapido cuando se remueve la carga por lo que se debe manejar siempre con -- carga, ya que sin carga el motor se encarrera y tiende a desbocarse.

De la ecuación $I_a = (V - (K \cdot \phi \cdot \omega)) / R_a$, despejamos a la velocidad $\omega = (V - I_a R_a) / (K \cdot \phi)$, sí el voltaje tiene un valor cercano al voltaje de placa de la máquina, el factor $I_a R_a$, - afectará cuando la sobre carga de un motor derivación cambia la I_a , el cambio máximo en el producto $I_a R_a$, se da entre plena carga y sin carga, aproximadamente es del 2% al 5%, del - voltaje (V), entonces el máximo cambio en la velocidad debe - ser igual en magnitud respecto a $I_a R_a$. En los motores deriva- ción los parámetros K, V, R_a y ϕ son casi constantes, la uni- ca variable es I_a , al aumentar la carga del motor la I_a crece el numerador de la velocidad decrecerá, así mismo al aumentar- la carga la velocidad disminuye, se considera que la veloci- dad es constante en los motores derivación aun cuando esta -- disminuye muy poco al aumentar la carga, esto es consecuencia de la reacción de la armadura.

El flujo ϕ , decrecerá tambien al aumentar 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 en el motor derivación la variación de la velocidad que se produce cuando funciona con carga y en vacío (sin carga), esto nos 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 que la velocidad es directamente proporcional a la cantidad de la f.e.m.

Cuando a un motor compuesto se le remueve la carga se afectan dos factores, la corriente de armadura I_a y el flujo ϕ , en contraste con el motor derivación en el cual el resto del flujo es casi constante para todas las condiciones de carga.

Cuando en un motor compuesto decae el flujo total debido al efecto del campo serie, la velocidad variará -- más entre plena carga con relación a la velocidad de un motor derivación. Un motor serie debe ser operado de modo que no se permita que su carga decrezca, en general se observan los siguientes puntos;

1- la velocidad de todo motor es inversamente proporcional al flujo del campo, $\omega = (V - I_a R_a) / (K \cdot \phi)$.

2- el flujo producido en cierto motor serie depende enteramente de la corriente de sobre carga.

3- cuando la carga es densa, la corriente es proporcionalmente alta y en consecuencia el flujo tiene valores elevados por lo cual la velocidad es baja.

4- cuando la carga se disminuye (sin removerla por completo), la corriente disminuye y consecuentemente se reduce el flujo incrementandose la velocidad.

La caída del voltaje en el circuito de armadura, se debe a la resistencia de la armadura y a la resistencia del campo serie, lo que afecta a la velocidad en la misma forma pero no en la misma proporción, de modo que cuando la carga es densa el producto $I_a \cdot (R_a + R_{sa})$, es relativamente grande y causa disminución en la velocidad.

Cuando la carga es ligera, $I_a \cdot (R_a + R_{sa})$, 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 orden de importancia la característica veloo
cidad-carga de los tres tipos de motores son curvas típicas--
y se muestran en las graficas de las fig.2.6.2. y 2.6.3.

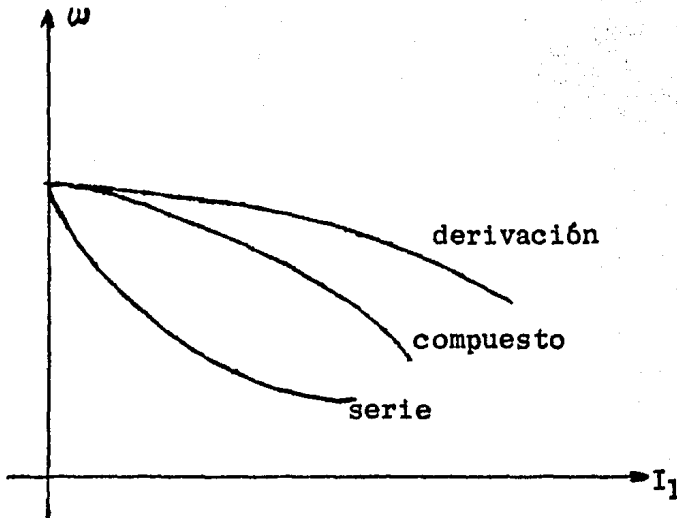


Fig.2.6.2. Curvas características de, Velocidad-Corriente.

Para los propositos de comparación los tres mo

tores se colocan a velocidades iguales y entregando la misma potencia cada uno de ellos, graficando el porcentaje de la velocidad contra el porcentaje de plena carga, obtendremos la ganancia de potencia en h.p.

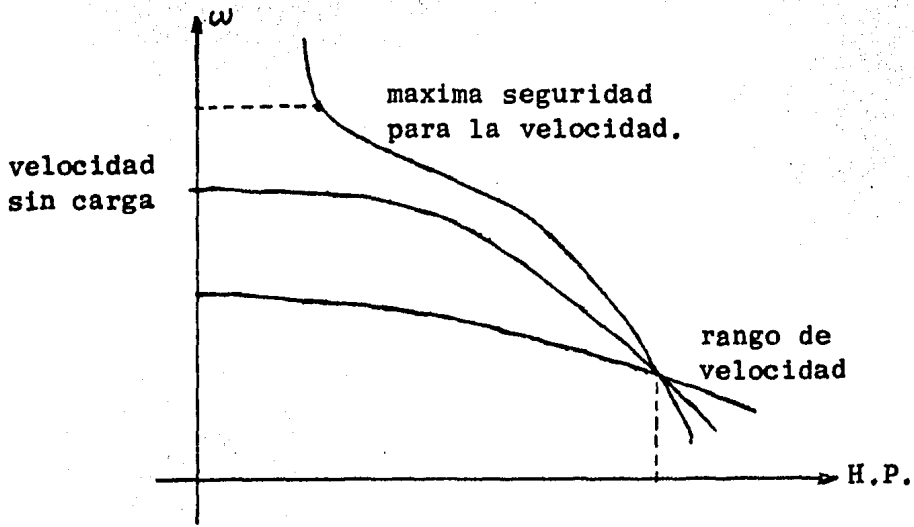


Fig.2.6.3., Curvas características de potencia.

de las curvas de la fig.2.6.3., se puede observar que, 1- La velocidad de un motor derivación es casi constante, teniendo el mismo valor sin carga, 2- La velocidad de un motor compuesto, varia considerablemente teniendo un valor definido sin carga, 3- El motor serie, opera sobre un rango de velocidad muy amplio y se debe cuidar que no se aleje de el.

se recomienda que el motor serie nunca sea operado en una zona o 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 las características que presenta el par desarrollado, generalmente los modelos para sistemas de precisión son usados con una sobreamplificación. Se propone desarrollar un modelo lineal para ambas máquinas, la de electroimán y la de imán permanente con el fin de hacer una comparación y resaltar las características de la máquina de imán permanente con respecto a la de electroimán, esto se hará por medio del modelo de la función de transferencia de dichas máquinas.

la respuesta del modelo será por lo tanto comparada, con las obtenidas experimentalmente para tal caso se uso, un motor -- electromagnético controlado por armadura tipo ASEA-I, con especificaciones de 220 volts de entrada, 6.3 amperes, 2050 rpm y 1 Kwatt de potencia (excitación separada), y un motor de -- imán permanente con especificaciones de, 90 volts de entrada- 9.5 amperes, 650 rpm y 0.736 Kwatt de potencia (excitación -- con imán permanente).

3.1 VOLTAJE CONSTANTE.

La fuerza electromotriz inducida entre las ter minales de salida de un generador de c.c., es;

$$E = (Z \cdot \phi \cdot n \cdot P) / (60 \cdot a) \quad \text{I}$$

si expresamos la velocidad en rad/seg., entonces el promedio de la f.e.m., esta dada por;

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

si designamos a K, como una constante particular de la máquina la ecuación se conbierte en;

$$E = K \cdot \omega \cdot \phi \quad \text{III}$$

donde, $K = (Z \cdot P) / (2 \cdot \pi \cdot a)$

si mantenemos constante el flujo ϕ , entonces la ecuación se -
convierte en; $E = K_e \cdot \omega$ IV

donde, $K_e = K \cdot \phi$, la ecuación IV, representa el voltaje constan-
te para una excitación dada en las máquinas en prueba operan-
do como generadores con excitación constante, si despejamos -
de la ecuación IV a $K_e = (E/\omega)$, se obtiene su valor para las -
dos máquinas con el voltaje constante;

máquina E.M. $K_e = 1.02$ volt/(rad/seg)

máquina P.M. $K_e = 1.13$ volt/(rad/seg)

3.2 CAIDA DE VOLTAJE.

La caída de voltaje a plena carga y excitación normal son usados para determinar los valores dinámicos de la máquina, por medio de la diferencia de tensión, que es un método exacto el cual da errores de 1%, en la medición dinámica de los parámetros de la máquina. La caída del voltaje en las escobillas de la máquina E.M., se determina por medio de la saturación de campo.

La máquina P.M., como generador proporciona un voltaje $V(I)$, el cual satisface la ecuación;

$$V(I) = E(I) - R_a I_a - \xi(I) \quad V$$

donde $\xi(I)$, es la caída de voltaje de la reacción de armadura la ecuación V, se satisface para cargas variables, velocidad fija y excitación constante de campo, así mismo la máquina -- funcionando como motor, con la misma velocidad y misma excitación, se puede escribir una ecuación que represente el voltaje aplicado en la entrada dado como:

$$U(I) = E(I) + R_a I_a - \xi(I) \quad VI$$

se puede trazar la curva que represente la caída de voltaje - en ambas máquinas, será el mismo para ambas máquinas siempre y cuando las escobillas esten alineadas en condiciones satisfactorias.

Las siguientes dos expresiones obtenidas de -- las ecuaciones V y VI, dan una comparación del voltaje de la reacción de armadura, así como la caída del voltaje en los -- conductores de la máquina P.M., para modo generador y motor;

$$\xi(I) = (\delta_g + \delta_m) / 2$$

$$R_a I_a = (\delta_g - \delta_m) / 2$$

el resultado grafico esta dado por la curva de la fig.3.2.1.

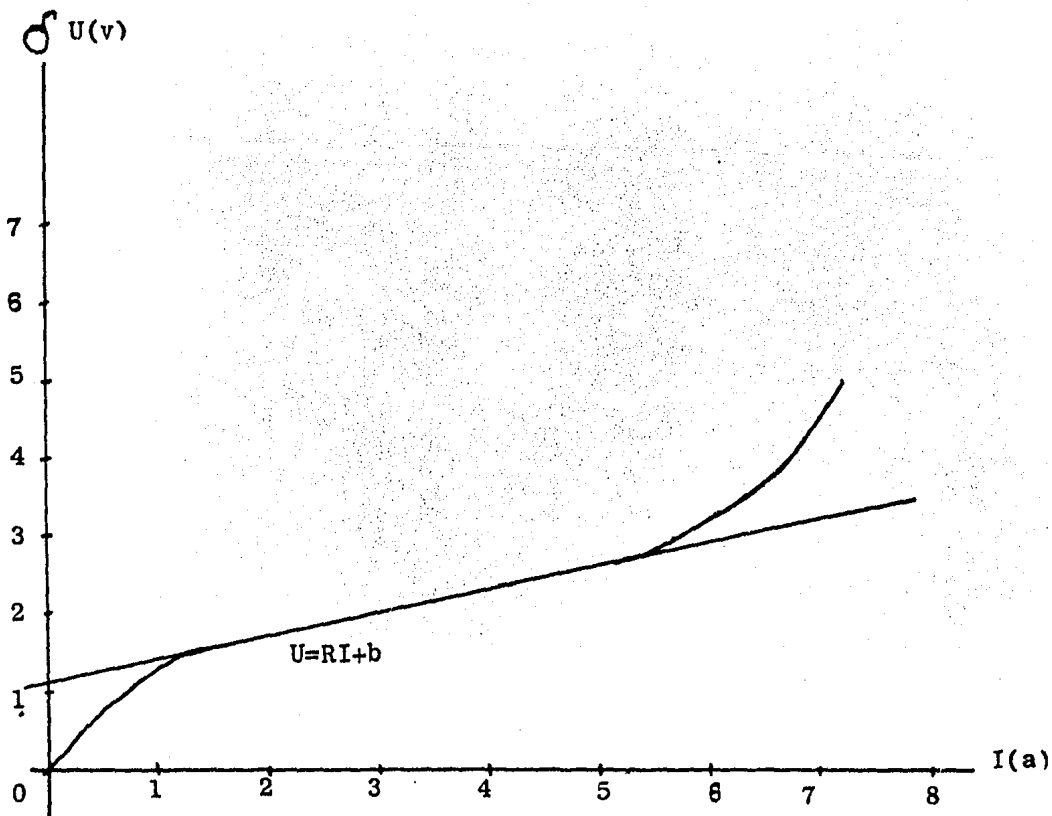


Fig.3.2.1., Curva de la determinación de la caída del voltaje en las escobillas (máquina no saturada).

$U(t)$ con $I=0$, y la máquina fuera de saturación, la parte inferior de la curva nos muestra que la $\xi(I)$, es muy pequeña por lo que la curva es prácticamente, $R_a I_a + b$, expresión que corresponde a una línea recta por lo que la caída del voltaje en escobillas es constante, la expresión queda

$$U(t) = R_a I_a + b(1 - e^{-aI}). \quad \text{VII}$$

La curva de la fig.3.2.1., representa a una --
función matemática, en base a la cual se obtubieron para cada
una de las máquinas los resultados siguientes.

máquina E.M., $U(t)=0.43(I)+1.32(1-e^{-1.24I})$ VIII

máquina P.M., $U(t)=1.2(I)+0.68(1-e^{-0.27I})$ IX

la fig.3.3.4., muestra como la reacción de armadura depende --
de la corriente de armadura y de la excitación del campo para
ambos modos, generador y motor con la misma reactancia de ar-
madura, sí el eje neutro se alinea con el eje de las escobi--
llas, sólo se presenta el efecto de la corriente de armadura--
que se analizara para una excitación de campo constante.

3.3 ANALISIS DE LA REACCION DE ARMADURA.

Una máquina de c.c., bipolar es la considerada
en el análisis teórico de la reacción de armadura, en la fig.
3.3.1., se muestra como se induce el flujo ϕ , debido a la ex-
citación de los polos, inducción en los ejes directo y en cua-
dratura, alineando el eje neutro con el eje en cuadratura.

Como en el eje de directa la corriente de armadura induce un flujo ϕ_d principal y otro flujo ϕ_q en cuadratura esto si no ocurre saturación, por lo tanto el eje de las escobillas estará sobre la línea neutral, por lo que se presenta el efecto de desmagnetización debido a la reacción de armadura y a la simetría de la máquina.

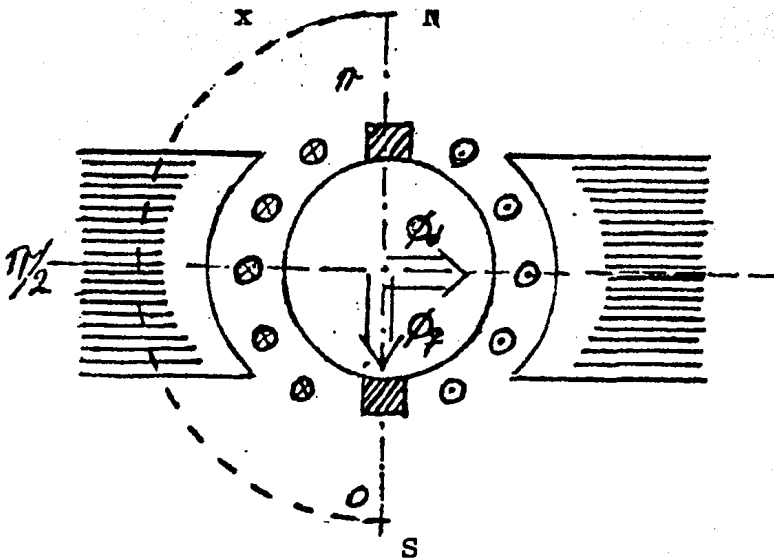


Fig.3.3.1., Diagrama de la distribución del flujo principal.

En la fig.3.3.2, se muestra la variación de la densidad de flujo en X (ángulo eléctrico de la máquina), sin carga, la densidad de flujo operando será B_a , ya que la saturación no ocurriera en el último punto del polo, la saturación

se presenta en el punto principal del polo, entonces la curva B_1 no es simétrica con respecto a $X=\pi/2$, y el área bajo B_1 , es menor que bajo B_0 , si el eje de las escobillas se mueve un

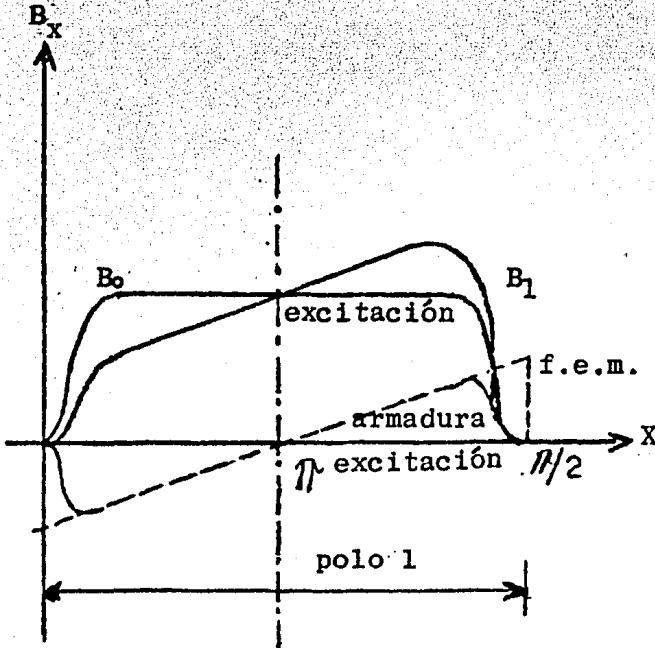


Fig.3.3.2., Grafica de la distribución de flujo, debido a la corriente de armadura.

ángulo α , hacia la línea neutral como muestra la fig.3.3.3., - la corriente de armadura induce un flujo que se puede descomponer a lo largo del eje principal como ϕ_{q1} se le llama flujo en cuadratura y ϕ_{d2} flujo en el eje de directa, la suma vectorial del flujo de excitación se representa por una expresión-

la cual se resuelve con un criterio de error pequeño, la ecuación que define a la reacción de armadura para una excitación normal esta dada por, $\xi(I) = K'(I) \cdot \omega$ X

donde K' esta dada por;

$$K'(I) = (1.24 + 4.5I + 4.6I^2 + 0.13I^3 + 3.9 \times 10^{-3} I^4) \times 10^{-3} \quad \text{XI}$$

valida para $I \leq 6.5$ amperes.

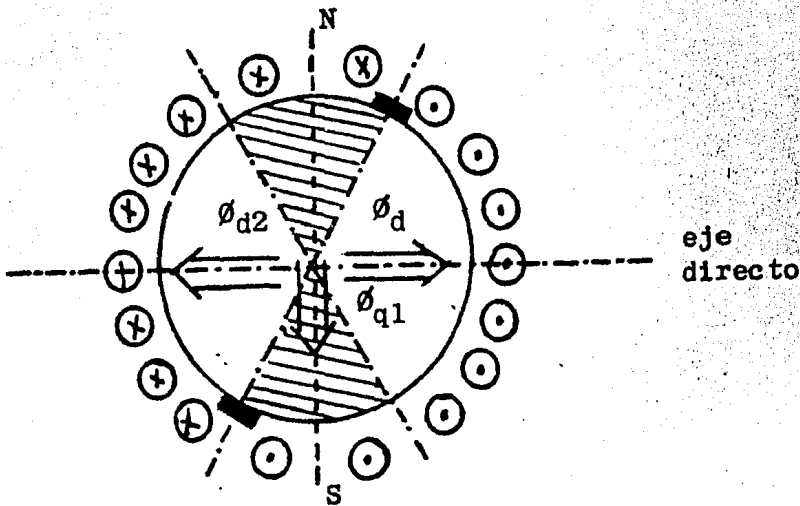


Fig.3.3.3., Grafica, mostrando el giro de las escobillas así como el flujo de armadura a lo largo del eje directa.

para la máquina P.M., la curva de la fig.3.3.5., se ha aproximado a una ecuación polinomial y para propositos practicos se toma la $\xi(I)$, como despreciable ya que es muy pequeña para -- que tenga efectos considerables en el resultado.

3.4. INDUCTANCIA DE ARMADURA.

Una vez descrita la forma para medir la reacción de armadura, se presentaran sólo los resultados medidos de la inductancia dinámica de la armadura, para ambas máquinas - así mismo se dan graficamente en las figuras 3.4.1.(a) y (b)- habiendose determinado las siguientes ecuaciones polinomicas- para ambas máquinas,

Para la 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.

Para $I=4.45$ amp., el valor de la inductancia - es de $L=23.9$ mh.

Para la máquina P.M.

$$L=2.3-1.3I+0.9I^2-0.4I^3+0.07I^4-0.007I^5+0.00026I^6 \quad \text{XIII}$$

sí, $I < 2.75$ amp. y $I \geq 2.75$ amp.

Para $I=2.75$ amp., el valor de la inductancia - es de $L=1.54$ mh.

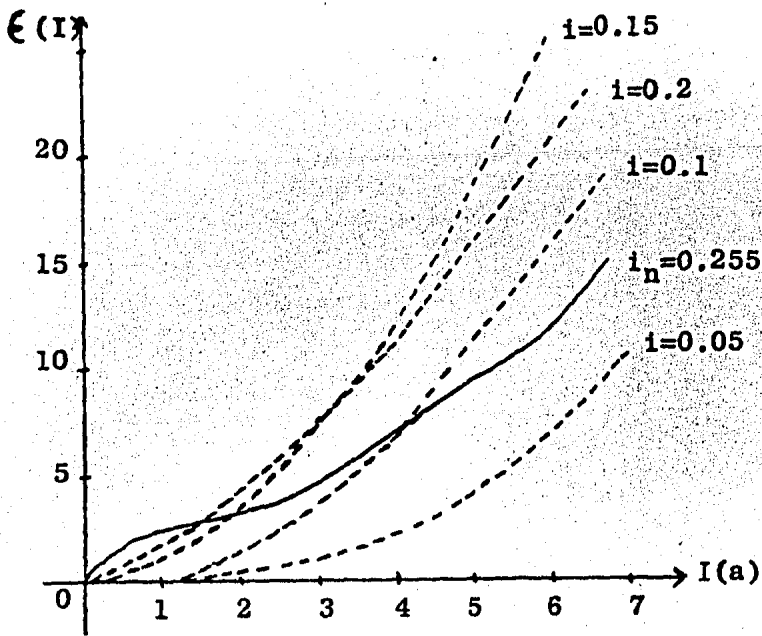


Fig.3.3.4., Grafica del voltaje de reacción de armadura para el motor E.M., variando las condiciones del campo

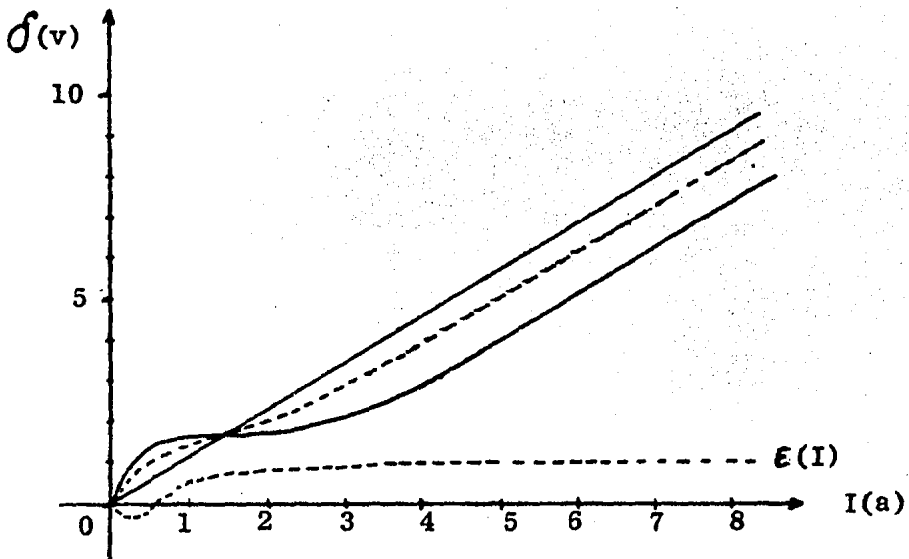


Fig.3.3.5., Grafica de la caída del voltaje en las escobillas así como la reacción de armadura para el motor P.M.

Esc. 1:75

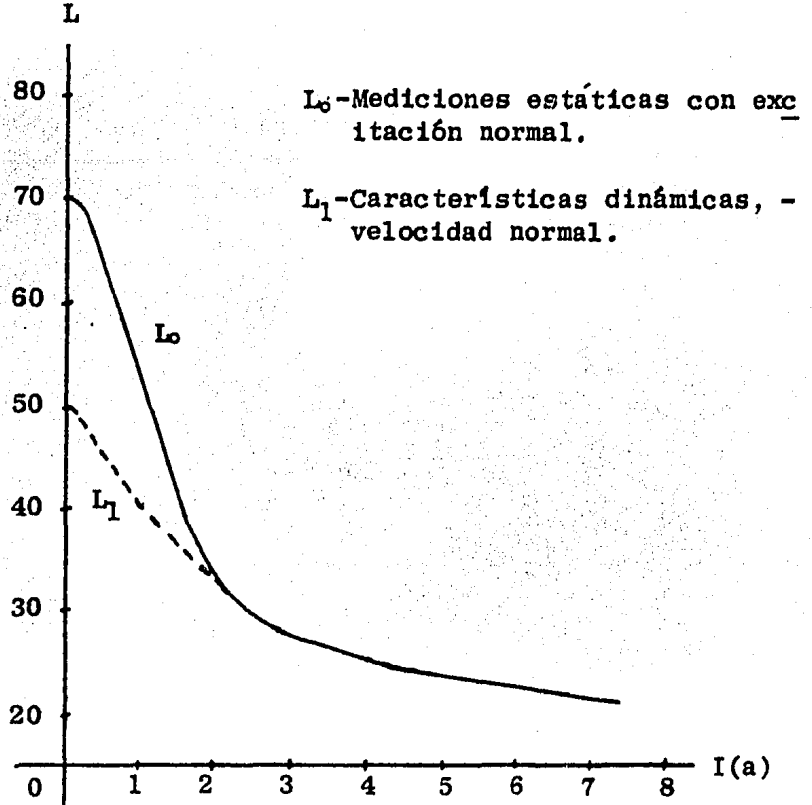


Fig.3.4.1.(a), Grafica de valores para la inductancia dinámica de armadura de una máquina E.M.

3.5 PARAMETROS MECANICOS.

La potencia suministrada a una máquina cuando esta en operación, esta dada por;

$$P=U.I$$

XIV

la energía disipada esta dada por $R_a I_a^2$, las pérdidas por fricción del aire son proporcionales al cuadrado de la velocidad angular así mismo las pérdidas debido a la fricción mecánica son proporcionales a la velocidad (fricción en baleros, escobillas, etc.), por lo tanto se puede escribir una ecuación para las pérdidas,

$$P = R_a I_a^2 + a \cdot \omega^2 + b \cdot \omega \quad \text{XV}$$

si igualamos las ecuaciones XIV y XV, se obtiene la ecuación XVI, así mismo haciendo pruebas a velocidad angular constante tenemos que $(d\omega/dt) = 0$, por lo tanto;

$$((U_m \cdot I) - (R_a \cdot I_a^2)) / \omega = a\omega + b \quad \text{XVI}$$

del lado izquierdo de la ecuación XVI, se puede calcular $U_m \cdot I$ y ω , con un valor definido de la resistencia, la curva experimental es una línea recta, así mismo despreciando las pérdidas en la carga se pueden calcular los valores de los coeficientes 'a y b' que con las especificaciones dadas se obtubo;

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

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

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

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

así mismo con ayuda de la ecuación XVII, podemos determinar - el parametro J.

$$\lambda_m = a\omega + b + J(d\omega/dt) \quad \text{XVII}$$

haciendo pruebas al motor en carrera descendente, el voltaje-
manejado a la velocidad ω , así mismo resolviendo la ecuación
diferencial XVII, con condiciones iniciales de $t=0$ y $\omega=\omega_0$, y
condiciones finales de $t_f=t$ y $\omega=0$, obtenemos;

$$J = (a.T) / \log(1 + \omega_0(a/b)) \quad \text{XVIII}$$

donde T, representa el par. La prueba de máquina en descen-
so será portadora de la salida a velocidad inicial diferente, al
resolver la ecuación para a, b y J, estableciendo la variaci-
ón del punto de operación en un rango del 1%, en las pruebas-
de la máquina, con carga se obtuvieron los siguientes resulta-
dos;

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

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

Esc. 1:50 L

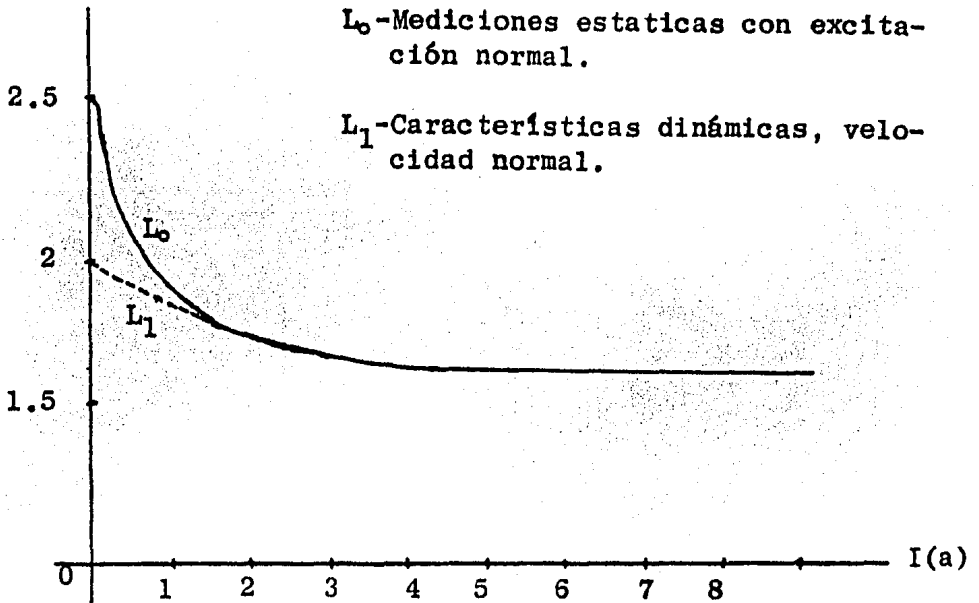


Fig.3.4.1.(b), Grafica de la inductancia dinámica de armadura para una máquina P.M.

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;

$$U(I) = E(I) + R_a I_a + (dI/dt)L(I) - \xi(I) \quad \text{XIX}$$

Así mismo la ecuación que representa el par del motor, se puede derivar de la ley de la conservación de la energía;

$$\lambda_m \omega - (E - \xi)I = 0 \quad \text{XX}$$

y por las ecuaciones IV, X, y XX, al combinarlas se obtiene;-

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

así mismo si combinamos las ecuaciones XVII y XXI, se obtiene

$$(K - K') \cdot I = a\omega + b + (d\omega / dt) \cdot J$$

un sistema general de ecuaciones diferenciales para una máquina giratoria se obtiene al combinar las ecuaciones XIX, XVII y XXI, obteniéndose;

$$U(t) = K\omega - K' \omega + R_a I_a + (dI / dt) \cdot L \quad \text{XXII}$$

$$K \cdot I = K' I + a\omega + b + (d\omega / dt) \cdot J$$

si se suma una resistencia directamente a la R_a , del circuito de armadura el par resistivo λ_r , estará en función de la ω ó de I , dependiendo cual característica se conosca, el sistema de ecuaciones XXII, no es valido para $t=0$, si $I=0$ y $\omega=0$, que son las condiciones de un instante antes de arrancar la máquina, evaluando la ecuación mecánica del sistema con las condiciones anteriores quedará;

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

que bajo las condiciones anteriores no podrá ser mayor que ce ro. Si se aplican las condiciones de $\omega=0$, y $I \leq (b/K)$, a la ecuación eléctrica del sistema XXII, se transformara en;

$$U(t) = R_a I_a + (dI / dt) \cdot L \quad \text{XXIII}$$

en las mediciones para estas condiciones, se hacen en función de una cierta corriente dada suficiente para generar el par de arranque que dominará a la inercia de la máquina.

3.7 MODELO LINEAL A TRAMOS.

El par debido a la fricción como se expreso en la ecuación XVI, es considerado como una función lineal de la velocidad. La resistencia sin carga así como la inductancia sin carga se consideran constantes así mismo como la reacción de armadura es muy pequeña se puede despreciar, por lo que el sistema de ecuaciones XXII, se transforma en;

$$U(t) = K\omega + R_a I_a + (dI/dt) \cdot L$$

XXIV

$$I \cdot K = a\omega + b + (d\omega/dt) \cdot J$$

es un sistema de dos ecuaciones diferenciales de primer orden

En este sistema de ecuaciones diferenciales es donde se hace la aproximación lineal aplicandole la transformada de Laplace, el sistema de ecuaciones quedará;

$$\omega(s)K + I(s)(R + sL) = U(s) + I_0 L$$

XXV

$$\omega(s)(a + sJ) - I(s)K = \omega_0 J - (b/s)$$

los coeficientes 'a' y 'b', incluyen el par resistivo, la determinación del sistema esta en función lineal de la velocidad y corriente, representado por el determinante;

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

XXVI

y los polos estar dados por;

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

XXVII

la ecuación general de la transformada de Laplace para la velocidad y corriente, se derivan del sistema de ecuaciones XXV

$$\omega(s) = \frac{s^2 \omega_0 + s((K/J)I_0 + (R/L)\omega_0 - (b/J)) - (Rb/JL) + sU(s)(K/JL)}{s(s-s_1)(s-s_2)}$$

XXVIII

$$I(s) = \frac{s^2 I_0 + s((a/J)I_0 - (K/L)\omega_0) + (bK/JL) + ((sU(s)a/JL) + ((s^2 U(s))/L))}{s(s-s_1)(s-s_2)}$$

Como se vio en la discusión del sistema XXII - la corriente se deberá elevarse a un valor b/K, antes que el-

motor arranque, en el dominio del tiempo la ecuación de la corriente quedará;

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

para $\omega(t)=0$, y para $I(t) < b/K$, la inductancia es calculada para $\omega(t)=0$, dando un valor de 70 mh. (mili-henris), para el motor E.M., y de 2.4 mh., para el motor P.M., en el inicio de arranque del motor, se presenta un par de arranque que esta representado por la ecuación;

$$T = (L/R) \log(UK / (UK - Rb)) \quad \text{XXX}$$

para, $I(T) = b/K$, como $U(s) = U/s$ entonces aplicando el estado de condiciones iniciales dado anteriormente a la ecuación XXVIII se reduce a;

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

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

así mismo las ecuaciones XXXI, se pueden transformar en;

$$\omega(s) = \omega_f \left[(1/s) + \frac{(-s + 2A)}{(s+A)^2 + \eta} \right]$$

XXXII

$$I(s) = (I_f/s) + \frac{(-sI_f + B)}{(s+A)^2 + \eta}$$

donde, $\omega_f = ((UK) - (Rb)) / ((Ra) + K^2)$, es el estado final estable de la velocidad y $I_f = ((Kb) + (Ua)) / ((Ra) - K^2)$, es el estado final estable de la corriente y también $A = (1/2)((R/L) + (a/J))$, es el coeficiente de amortiguamiento y $\eta = ((Ra + K^2) / JL) - A^2$, es la velocidad angular de la respuesta no amortiguada presentándose tres casos;

Caso 1, de oscilación amortiguada η es negativo para la ecuación XXXII, para determinar los parámetros de la ecuación se aplica la transformada inversa de Laplace.

$$w(t) = \omega_f + \omega_1 \cdot e^{-At} \text{sen}(\sqrt{\eta} \cdot t + \phi) \quad \text{XXXIII}$$

donde,

$$\omega_1 = (\omega_f / \eta) \sqrt{\eta + (((a \cdot b) / (J \cdot K)) + (U/L) - A)^2}$$

$$\phi = \tan^{-1}(\sqrt{\eta} / (((a \cdot b) / (J \cdot K)) + (U/L) - A))$$

$$I(t) = I_f + I_1 \cdot e^{-At} \text{sen}(\sqrt{\eta} \cdot t + U) \quad \text{XXXIV}$$

donde,

$$I_1 = (I_f / \eta) \sqrt{\eta + (((a \cdot b) / (J \cdot K)) + (U/L))^2 / I_f - A}$$

$$U = \tan^{-1}((-\sqrt{\eta} \cdot I_f) / (((a \cdot b) / (J \cdot K)) + (U/L) - AI_f))$$

Caso 2, amortiguamiento crítico $\eta=0$, 6 bien -

$$4K^2=(R.J)-(a.L)$$

$$\omega(t)=\omega_f(1-e^{-At}+3At e^{-At}) \quad \text{XXXV}$$

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

Caso 3, sobreamortiguado $\eta>0$, y con;

$$s_1=-A+\sqrt{-\eta} \quad \text{y} \quad s_2=-A-\sqrt{-\eta}$$

$$\omega(t)=\omega_f(1+(s_2/(s_1-s_2))e^{-s_1 t}+(s_1/(s_2-s_1))e^{-s_2 t})$$

XXXVII

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

3.8 FUNCION DE TRANSFERENCIA.

En la mayor parte de los libros de teoría de control, los modelos lineales simples se usan para obtener -- una función de transferencia en el plano complejo, para nuestro ejemplo se desarrollo un modelo en el cual se desprecia -- la constante de fricción " b", ésto se hace con base en la -- ecuación XVI.

la resistencia de armadura e inductancia, se toman como constantes y como la reacción de armadura es muy pequeña, entonces el sistema de ecuaciones se reduce a la forma;

$$U(t) = K\omega + R_a I_a + (dI/dt)L \quad \text{XXXIX}$$

$$I.K = a\omega + (d\omega/dt)J \quad \text{XL}$$

Del sistema de ecuaciones anterior, se puede obtener la función de transferencia para la velocidad como;

$$H(s) = \omega(s)/U(s) = \frac{K}{(R+sL)(a+sJ)+K^2}$$

arreglandola;

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

Donde s_1 y s_2 , están dados por la ecuación -- XXVII, y la función de transferencia para la corriente está dada por;

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

3.9 DIAGRAMA DE BLOQUES Y SIMULACION ANALOGICA.

Para la ecuación XXIV, se obtuvo el diagrama de bloques representado en la fig.3.9.1., condicionando al coeficiente de fricción $b=0$, de la misma forma se obtiene un diagrama de bloques para la función de transferencia de la máquina representada por la ecuación XLI, la simulación de esta función en una computadora análogica, se lleva a cabo usando generadores de función para representar los valores de R_a , L , J , K , y al coeficiente de fricción 'a'

La simulación en la computadora análogica para el motor P.M., se lleva a cabo con las siguientes relaciones;

$$\frac{dI}{dt} = -(R_a/L)I - (K/L)\omega + (1/L)U \quad \text{XLIII}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = (K/J)I - (a/J)\omega \quad \text{XLIV}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

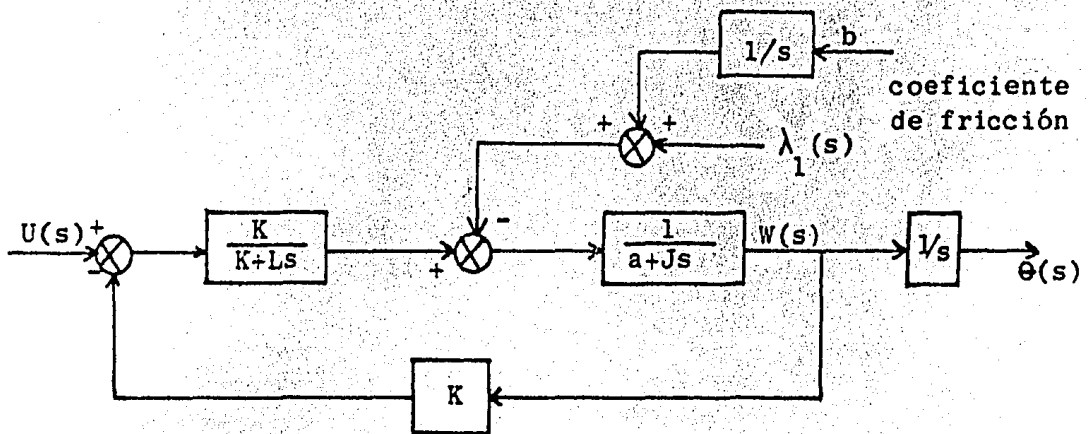


Fig.3.9.1. Diagrama de bloques representativo de la función-de transferencia de un motor de c.c., controlado-por armadura.

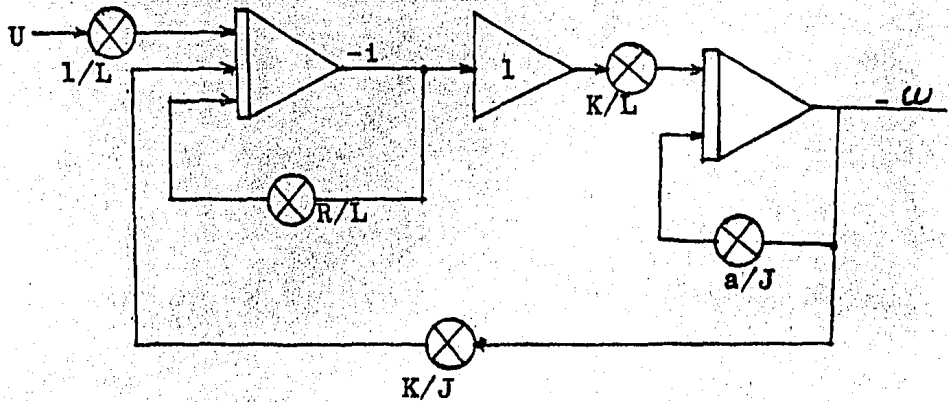
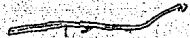


Fig.3.9.2. Diagrama de alambrado, para simular la función de transferencia de un motor de c.c., en una computadora análogica.

La simulación análogica, nos permite hacer estudios de simulación, análogos a los modelos reales para el diseño de motores de velocidad controlada y para ciertas pendientes de estabilización, y constantes de tiempo de $T=10^3$, y

con un alto orden de transitorios presentes en la simulación y que se pueden estudiar fácilmente 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 volts, 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 la corriente originado por el -- cálculo y puede ser de hasta 7.3 amp., y con rangos de tiempo de $5 < t < 2.25$ mseg., que es semejante a los datos obtenidos con un modelo líneal a tramos el cual dio una $I_{\max} = 6.74$ amp., y un tiempo de $t = 12$ mseg., el valor del tiempo es muy diferente ya que se eleva a más de dos veces el valor real.

La función de transferencia del modelo en -- prueba, en comparación con uno real dá tiempos iguales y la misma amplitud para la corriente, pero en estado estable final de la corriente y de la velocidad tienen diferencias con siderables.

La fig. 3.10.1., muestra la elevación de la -- curva de corriente para los modelos mostrados para I_{nL} e IL , 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 dá un error de 62% respecto al estado final, así mismo sobre el transitorio del modelo lineal a -- tramos. La fig. 3.10.2., muestra curvas análogas para el mo mento de arranque del motor P.M., los resultados básicos 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 reac-- ción de armadura es muy baja.

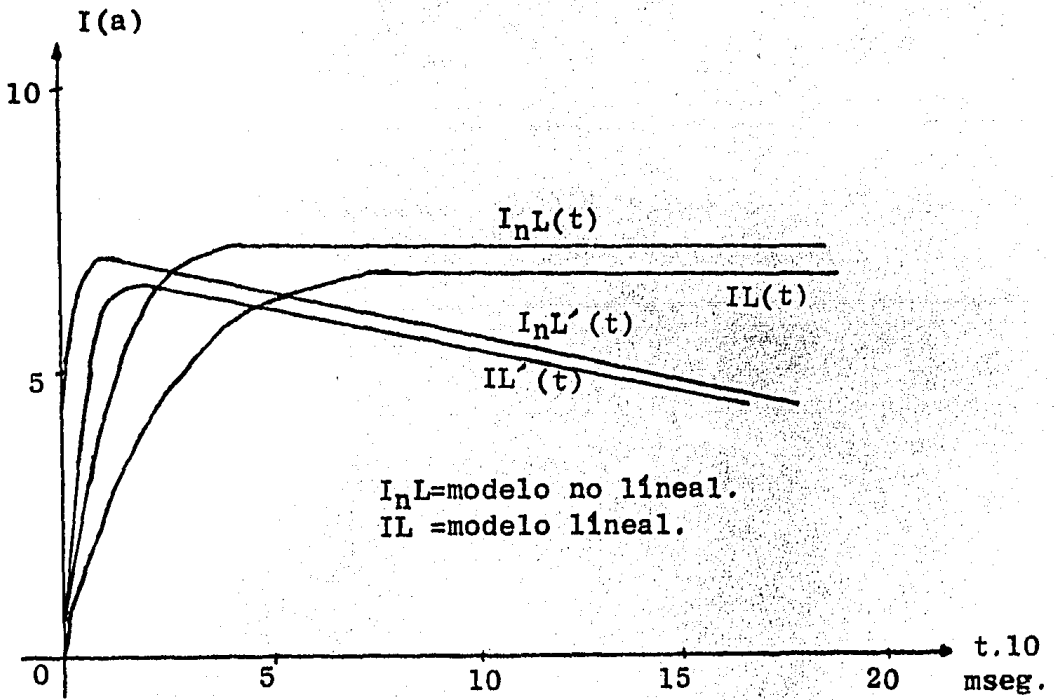


Fig.3.10.1., Curvas de la corriente de un motor E.M., en el momento del arranque.

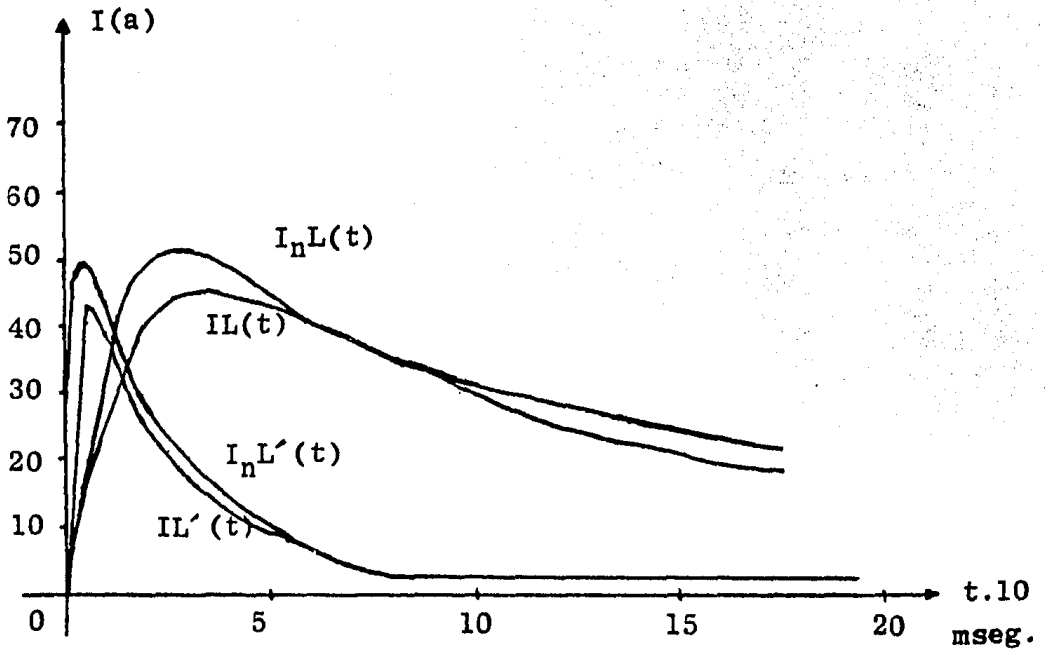


Fig.3.10.2., Curvas de la corriente de un motor P.M., en el momento del arranque.

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 demás valores están dentro de rangos razonables, el modelo lineal da los transitorios iguales así como el modelo lineal a tramos su valor estable de uno de ellos difiere sólo en 1%, del valor real. Este experimento nos muestra la validez del modelo no lineal dando el rango de exactitud que nos brinda el modelo lineal a tramos, que se aproximo al modelo lineal.

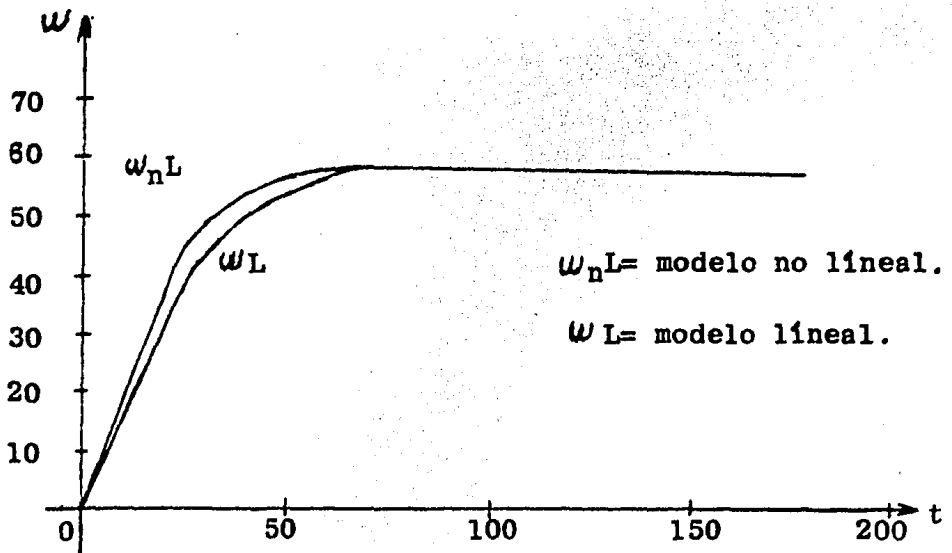


Fig.3.10.3. Curvas de características de la velocidad inicial de una máquina P.M.

3.11 CONCLUSIONES.

Una investigación de los parámetros de una máquina de c.c., que resultaron de desarrollar un modelo matemático el que se derivó de un modelo lineal a tramos, este modelo originalmente era un caso no lineal, los resultados obtenidos en el estado estable de las respuestas de cada modelo son iguales a los de un modelo lineal. Es más fácil tratar en la mayoría de las aplicaciones un modelo linealizado debido a la simplicidad para transformarlo a un diseño simple y así poder usar los criterios de Bode y Nyquist, para estudiar los transitorios de la corriente debidos a la regulación del par y al control de la velocidad. Aplicando el modelo lineal a tramos se muestra que usando un motor de imán permanente, el frenado eléctrico es más seguro estando un error sólo del 10% en este tipo de motores.

El modelo exacto del motor permite excelentes pronósticos del funcionamiento de un motor de c.c. Si se adapta e introduce un control óptimo y ayudándose con una computa

dora digital la que permite usar el modelo lineal a tramos -- dando resultados muy apegados a los reales.

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 ésto la reacción de -- armadura en el eje de cuadratura es menor que en la máquina - E.M., esto se nota 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 periódico.

La fig.3.11.1., presenta un análisis del com-- portamiento 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 relativa mente alto, como muestra la fig.3.11.1., para ϕ_{d2} .

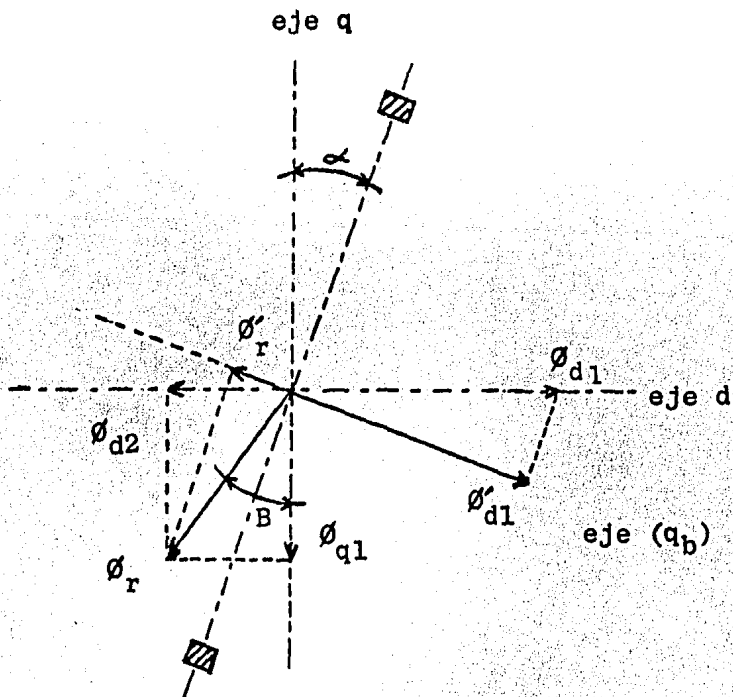


Fig.3.11.1. Grafica del análisis vectorial de los flujos en una máquina, E.M.

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, esto -

se debe a la baja permeancia de los materiales magnéticos con que se construyen los polos y a la reluctancia en cuadratura que es relativamente baja, por lo que el desplazamiento causará un incremento del 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., muestra que el flujo resultante ϕ'_r , sobre el eje (q_b), 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 de la excitación, mientras el resto de las componentes del flujo en cuadratura se restaran.

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

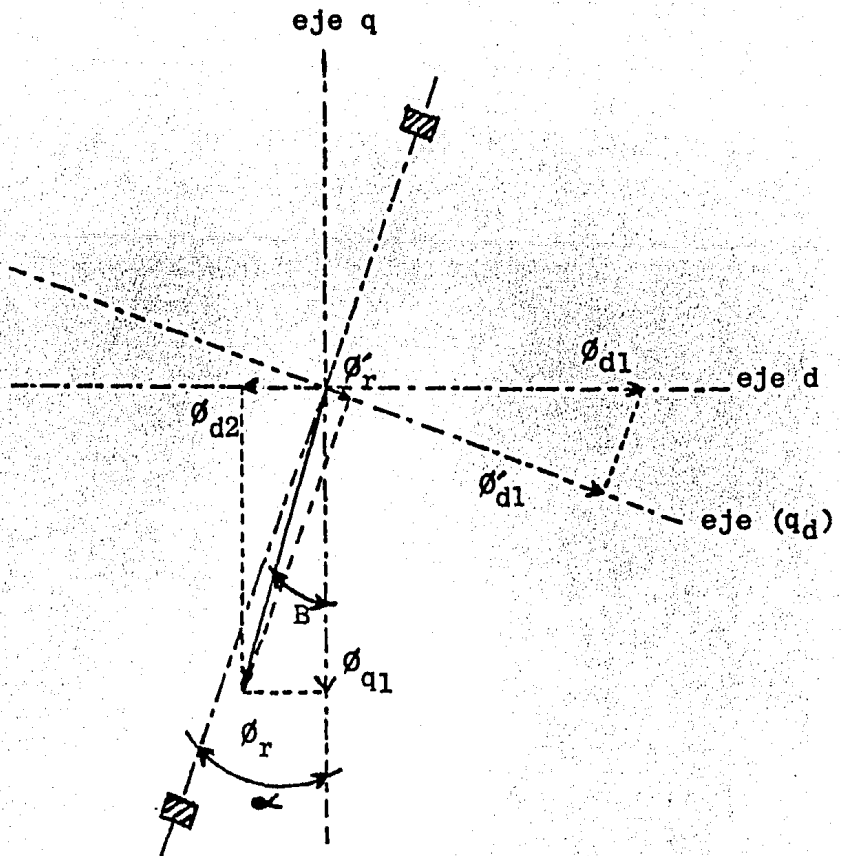


Fig.3.11.2. Grafica del análisis vectorial de los flujos en -
una máquina, P.M.

4 APLICACIONES.

La única diferencia entre los motores de imán-permanente y los 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 imanes es el elemento Alnico.

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

Análizando el rango de operación de un motor - de c.c., de Cobalto-Samarium (aleación de materiales magnéticos), haremos una breve descripción de las propiedades magnéticas de ciertas aleaciones que se han elaborado con elementos, de tierras raras las cuales poseen propiedades magnéticas permanentes, estas tienen propiedades particulares debido a la solidez del campo que producen y a su energía que poseen

la que es inigualable y muy económica, el 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 aumentando por consiguiente su comercialización de materiales con propiedades magnéticas como el cobalto y samarium cuya formula 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 desarrollado 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 de bajo costo en los materiales magneticos que lo forman, el samarium es un material relativamente costoso por la refinación a que se le debe someter. El material de lija Monazite es un material del subgrupo de las tierras raras que tambien-

requiere de una cierta refinación. Las fuentes o mantos de co
balto son relativamente abundantes superiores a las conocidas
hasta hoy, este material tiene una gran vulnerabilidad.

4.2 CARACTERISTICAS MAGNETICAS.

Las características magnéticas del cobalto-sa
marium tienen gran importancia respecto a otros materiales -
magnéticos rígidos, se han recopilado curvas de desmagnetiza-
ción para algunas aleaciones y grupos de estos materiales pa-
ra 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 den-
sidad de flujo entre estos grupos, el eje horizontal corres-
ponde al producto de energía BxH , para un grupo considerado,-
seleccionando un punto que determine el volumen de material -
magnético que sea requerido, esto es longitud y área de la --
sección transversal de éste.

El punto de operación para el grupo A, co
balto

Simbolo	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.

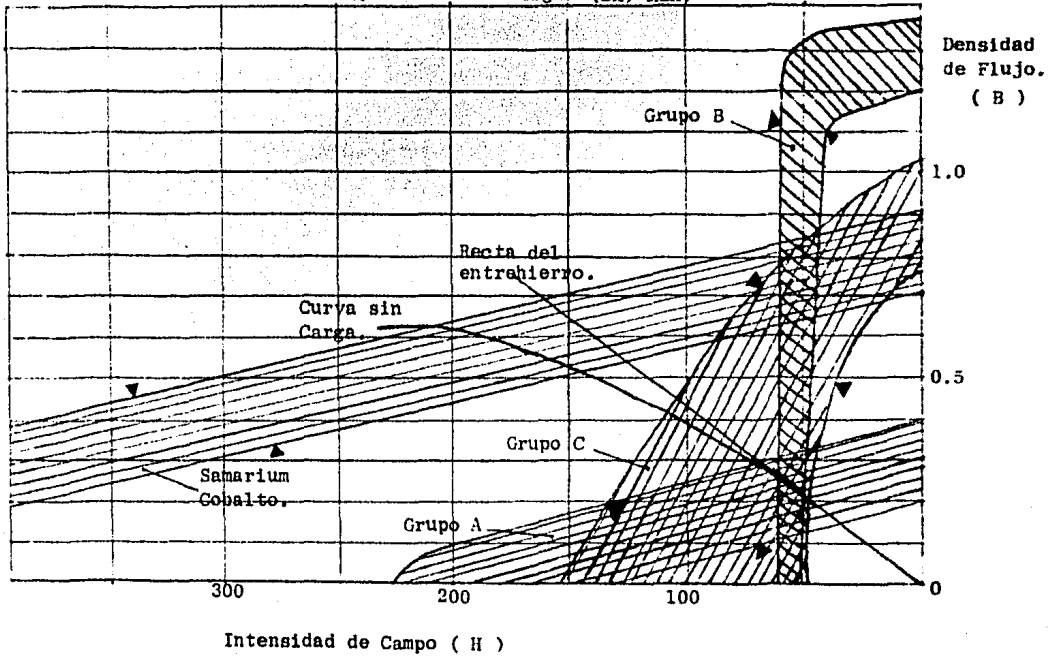


fig. 4.2.1. Curvas de desmagnetización, para diferentes grupos de materiales, así como de la aleación de Cobalto y Samarium.

-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 dará en la curva un producto $B \times H$ de energía, que será el máximo por unidad de volumen.

Los materiales del grupo A de la clasificación cerámica-ferrita, tienen gran demanda debido a su bajo costo pero los motores fabricados con esta aleación son voluminosos y con altas temperaturas, la curva de desmagnetización de estos materiales es 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 el área es dos veces y la densidad del flujo es la mitad. El par motor tiene un crecimiento proporcional al flujo, este se puede recuperar -- ajustando las muescas del motor, localizadas en los dientes de la entalladura con lo cual se incrementa el flujo de corriente en la armadura.

Los materiales del grupo B, tienen una remanencia elevada y baja coercitividad, un ejemplo de estas aleaciones es la formada con 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 imántados 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 elección del punto de operación no se dificulta para el material 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 de las características de este, el aprovechamiento de la energía de excitación y la densidad del flujo del imán es 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, aumentará proporcionalmente la densidad de flujo - así mismo al incrementar la región de excitación, aumentará - el par del motor en un factor de 1.5 del total de la energía magnética, la potencia se incrementará en un factor de 2.5, - regulándose la velocidad al tiempo de respuesta, aunque se -- desprecia la constante eléctrica de tiempo (CET), por ser 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, el cual reduce el costo para el punto de operación en valores del 85%, en la densidad del flujo. Para un cierto volumen económico nos permite aprovechar la excitación del entrehierro, si incrementamos el claro del entrehierro el flujo emitido por las caras polares no ayuda a reducir la inductancia de armadura, por lo que los efectos de reacción de armadura no disminuyen, también se debe a que la permitividad de los materiales magnéticos es baja en consecuencia la trayectoria del flujo no aumenta la reluctancia en el entrehierro, por lo que se presentará una desmagnetización del material magnético en función de la reacción de armadura.

La ampliación en la conmutación esta en función de la variación de las escobillas e inductancia de la armadura y la longitud del entrehierro queda determinado por el voltaje y par de la armadura.

Empleando el motor en un rango seguro, se incrementará la respuesta dando una constante de tiempo más pequeña, la computadora es una herramienta con la que podemos hacer un análisis detallado del funcionamiento de un motor de imán permanente así como dimensiones y curvas características y volumen de imán requerido.

4.4. DESARROLLO DEL MOTOR.

Una lista de parámetros de funcionamiento para un rango de la aleación SmCo_5 , en el diseño de cuatro motores el diseño del motor N°2, es una variación del diseño del 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 también es una variación del diseño N°2, este tiene un incremento en la longitud del entrehierro, el par es proporcional al voltaje de arranque, con una constante de tiempo $(\omega K)^{-1}$, donde ω , 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, es el diseño más pequeño y de más bajo costo en el material magnético, también con un punto de operación en la región de máximo producto de energía estos cuatro diseños son prototipos de un servomotor de operación transitoria, con funcionamiento normal en estado estable, en las figs.4.4.1, y 4.4.2., se muestran los resultados obtenidos en los diferentes tipos de pruebas en el --

Parámetros de funcionamiento de motores de c.c. de imán 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	-----
" eléctrica..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 devanado.					
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 arranque.....	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
Limite de conmutación.					
Par.....	Nw-M	-----	0.45	-----	-----
Velocidad.....	rpm.	-----	8000	-----	-----

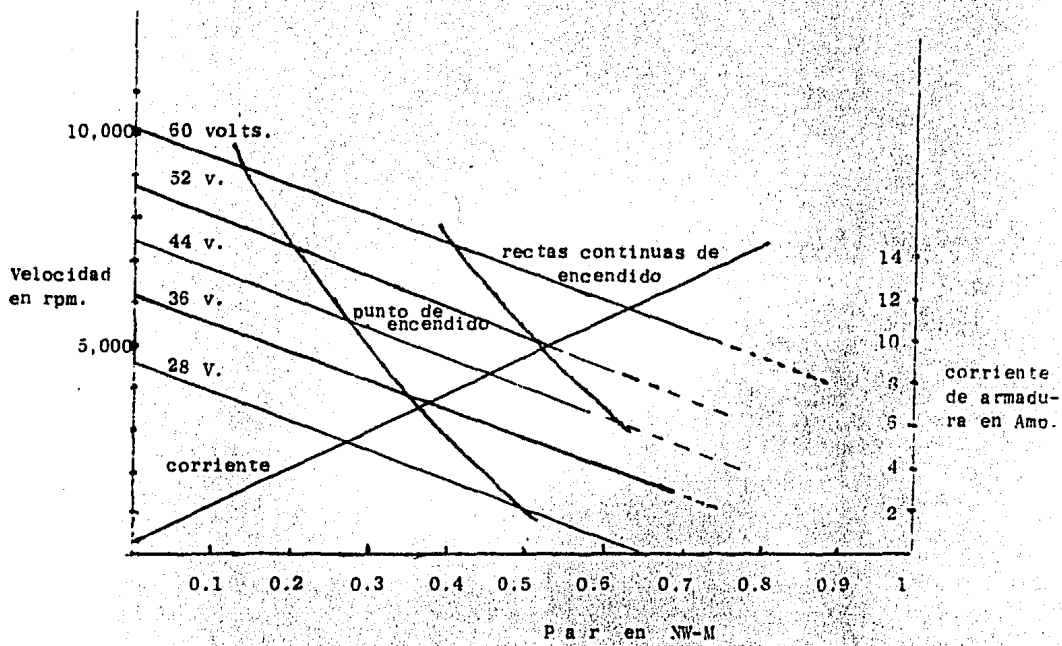
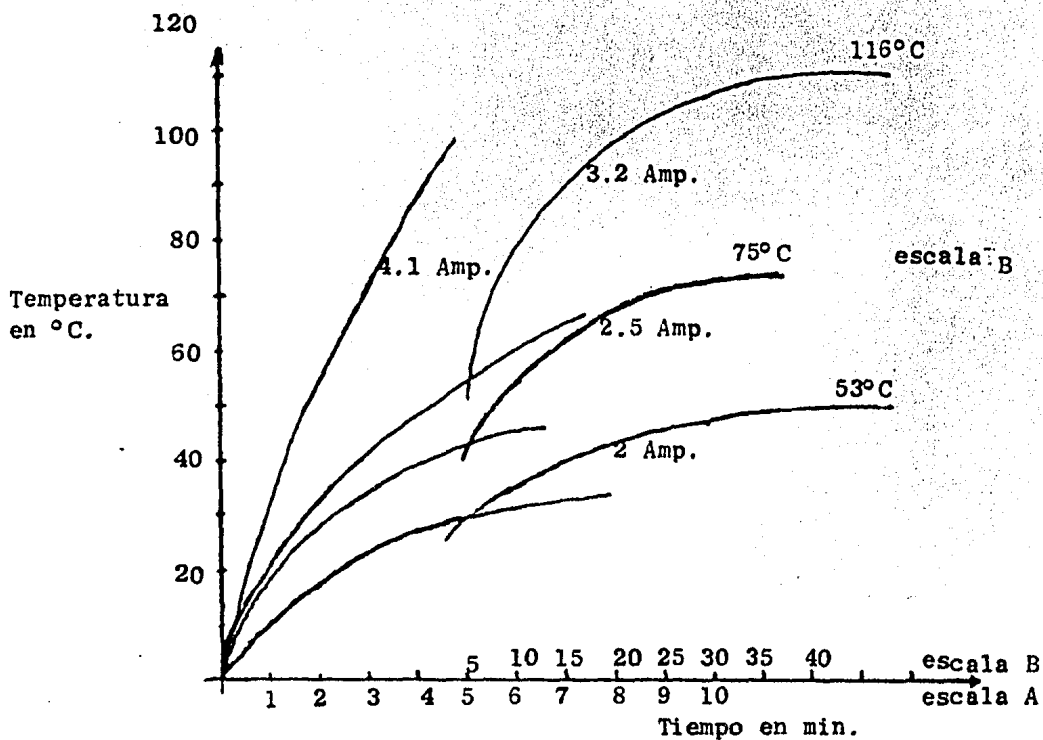


fig. 4.4.1. Grafica de zonas de conmutación, para un motor de c.c. de imán permanente, de cobalto y samarium.



Desboque de motor estandarizado,
 Tth, Constante térmica de tiempo=6.1-7.5 min.
 Rth, Resistencia térmica.=3.5-3.8 °C/Watt.

fig.4.4.2. Grafica de constantes térmicas de tiempo para un motor de c.c. de imán permanente, de cobalto y samarium.

diseño del motor N.2, y en la fig.4.4.3., se muestra un proto tipo de este diseño.

En la grafica de la fig.4.4.4., se muestra la CET, del motor con un voltaje aplicado de 28 volts de c.c., - así mismo en la fig.4.4.1., se presenta la velocidad en funci ón de este voltaje, el par y el valor instantaneo de la resis tencia de armadura. El cálculo de la resistencia térmica se - hace en función del calor almacenado en la armadura, calor di sipado por el hierro, fricción y perdidas en los embobinados.

El tiempo en el que se eleva la corriente, se- representa por el 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 son despreci- ables, corrigiendose éstos con el acoplamiento de la carga, - la inercia se localiza en la tabla I, dando un valor de 78 gr -cm, y una constante mecánica de tiempo (CMT), de 6.4 mseg.,- la fig.4.4.5., muestra la banda media donde se sujeta el mo- tor con un voltaje de 28 volts suministrados por una señal se noidal de 8 volts de pico a pico, en una banda media de tres- decibeles que es igual a 25 hz, (6.4 mseg.).

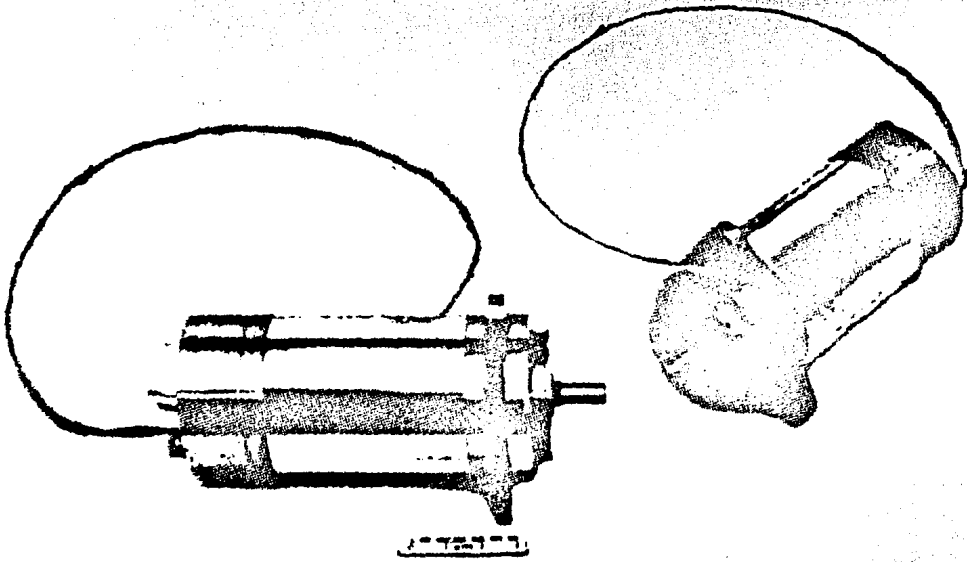
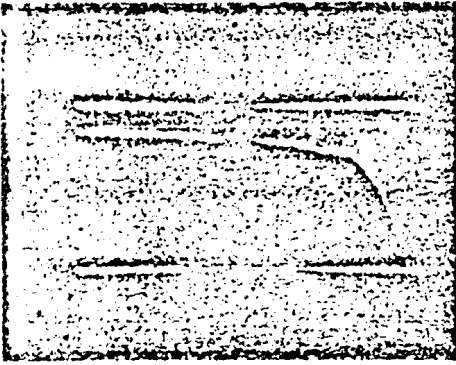
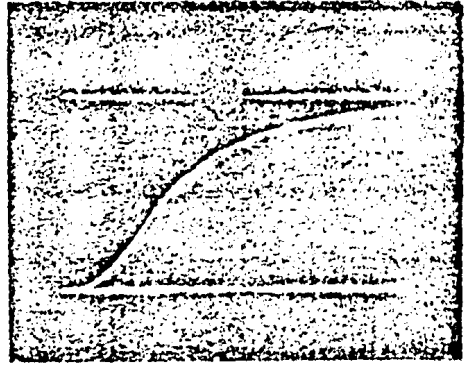


Fig.4.4.3., Representación fotografica, del motor N.2, con -
imán permanente.



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



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

(a)-Constante eléctrica de tiempo

(b)-Constante mecánica de tiempo.

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

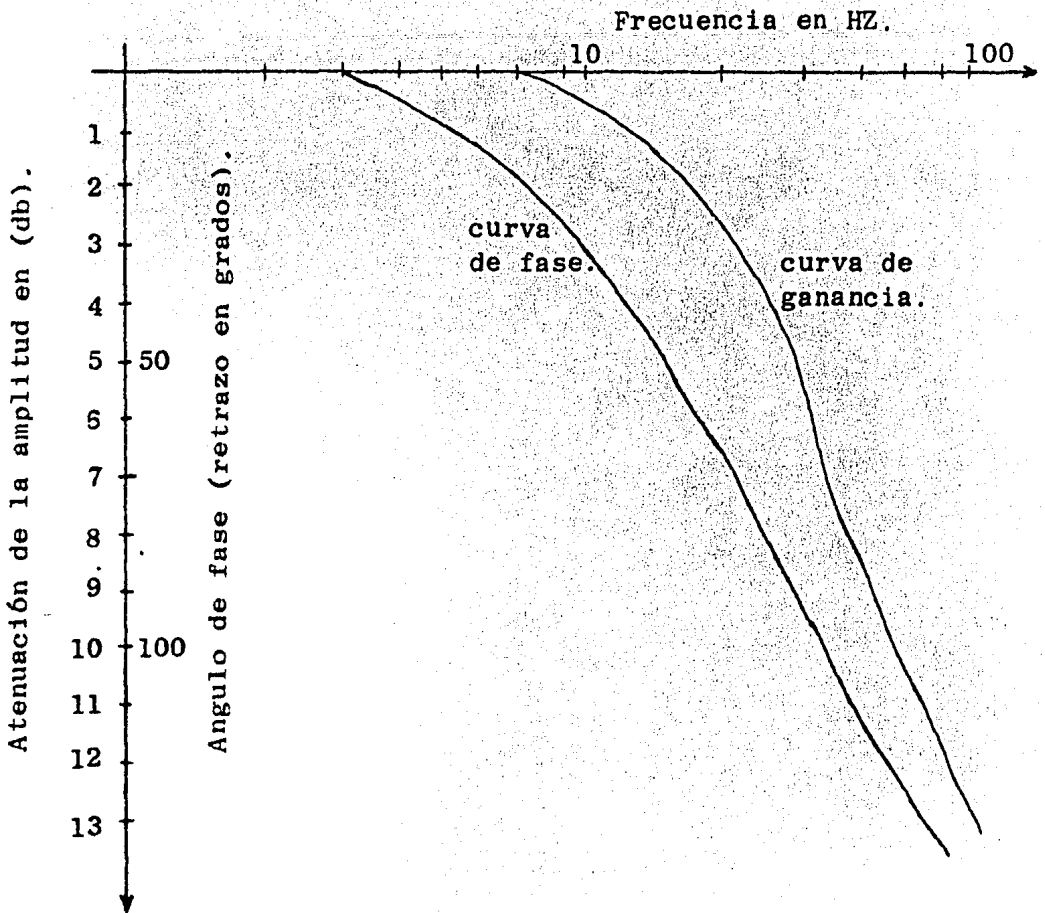


Fig.4.4.5., Grafica de respuesta en frecuencia de un motor de imán permanente, con aleación de Cobalto-Samarium.

Refiriendonos nuevamente a la fig.4.4.1., que nos presenta las curvas de par-velocidad y corriente, localizandose 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% através 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 energia 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 especificas de los motores de imán permanente, los hacen ideales para cierto tipo de aplicaciones, estas características son:

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

Estas características, aplicadas adecuadamente pueden mejorar el funcionamiento de la máquina en función de la potencia y a velocidad constante.

Los motores de c.a., o convencionales de c.c., son ampliamente utilizados con estas características, los motores de c.c., de imán permanente en base a su par característico, es posible obtener ventajas en aplicaciones específicas

1. Ausencia de calentamiento de campo, operando el motor en un encierro total, los incrementos normales de 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 en los campos y principalmente por fricciones mecánicas en la armadura.

2- Línealidad en la característica par-corriente, las curvas de la fig.4.4.6., muestran las características de un motor de imán permanente, nótese que mientras el motor convencional requiere un 200%, de corriente sólo el 180%, de esa corriente es requerida por un motor de imán permanente, - esta diferencia puede tener un efecto significativo, en el valor eficaz así mismo es importante para la aceleración, sobre todo cuando aumenta la corriente.

3- Intensidad constante de campo, se puede usar para preveer caídas de carga, frenando dinámicamente con el campo y con un dispositivo de regulación pudiendose controlar la velocidad, sin excitación el motor conserva la intensidad de campo con lo que se puede controlar el frenado usando el campo en dos pasos de frenado dinámico, el motor no desbocará.

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

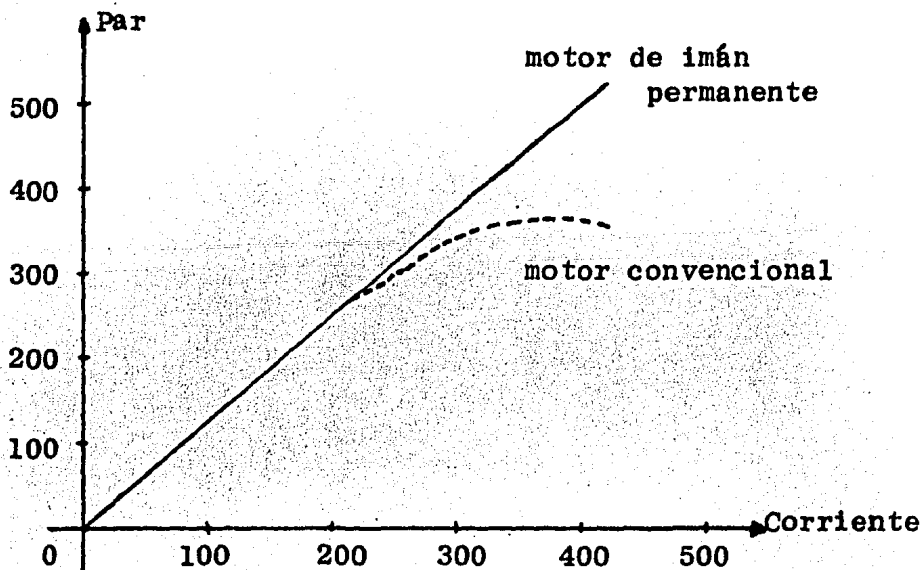


Fig.4.4.6. Curvas, características de par y corriente, para -
motores de imán permanente y convencional.

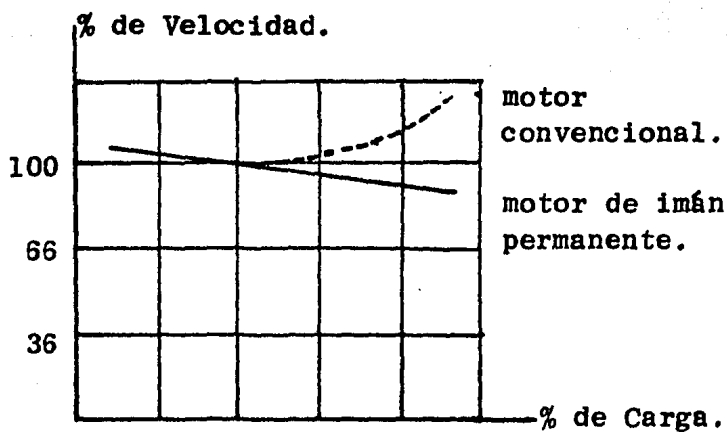


Fig.4.4.7. Curvas, características de velocidad en % respecto
a la carga, en motores de imán permanente y conven
cional.

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 acelerar el motor con carga fija, se puede seleccionar un valor nominal para una carga inercial que este entre la inercia del motor y la carga. En muchas aplicaciones se ha encontrado que en el 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 alambrada y encapsulada con material plástico y resina epoxica como se muestra en 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 estan en posición radial respecto a la flecha en que esta montada la armadura. En 1967, se comenzo el diseño y desarrollo de este tipo de motor, diseñando prototipos para varias aplicaciones.

Una de estas aplicaciones es en la industria - automotriz, en segadoras de césped, éstas fueron las primeras aplicaciones con las siguientes especificaciones, potencia de 900 watts, velocidad de 2500 rpm y 12 volts, también se han elaborado diseños para unidades motorizadas con especificaciones de potencia de 1.85 Kwatts, velocidad de 10500 rpm y 36 - volts con una relación de engranes de 16:1, así mismo se han diseñado para ventiladores y radiadores (enfriadores), los -- cuales tienen armadura de disco teniendo especificaciones de potencia de 90 watts, velocidad de 2730 rpm y 14 volts con armadura de disco teniendo ésta una longitud axial de 30 mm.

El diseño y construcción se hace de tal forma para que presenten baja inercia, con lo cual se consiguen aceleraciones y desaceleraciones rápidas, que son requeridas en la industria, éstas características se obtienen 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 epoxi, el

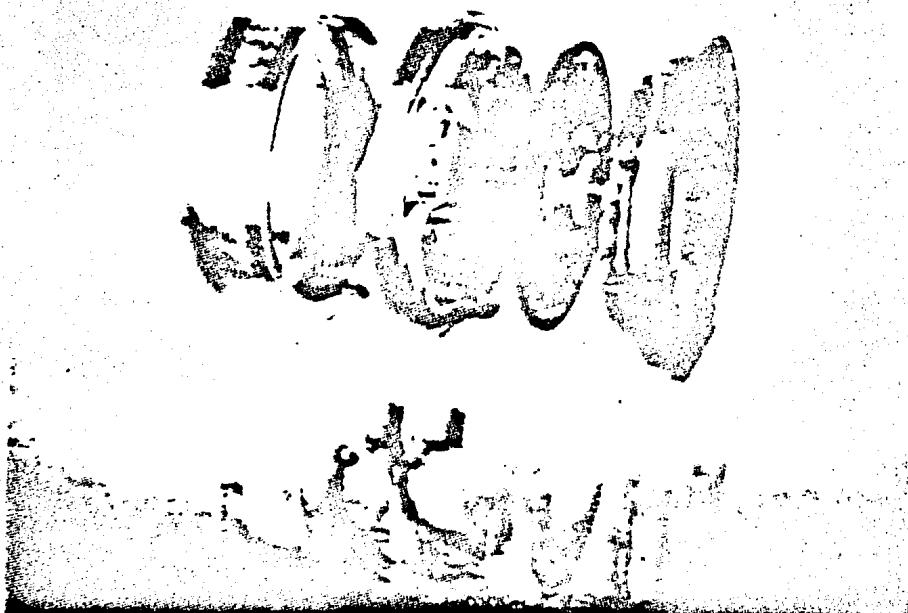


Fig.4.5.1., Motor de imán permanente con armadura de disco de baja inercia.

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 epóxicas, en el moldeo se obtiene la rigidez mecánica requerida.

Los devanados 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 ranura 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 deberá de ser 20 veces la longitud del claro. Es muy importante la longitud del claro en el diseño mecánico, para diminuir perdidas por fricción mecánica, la armadura deberá de

estar completamente cerrada.

4.6 RESULTADOS DE PUEBAS.

La fig.4.6.1., muestra las características del estado estable de un motor en pleno funcionamiento, con un voltaje aplicado de 45 volts, estas características son típicas para un motor con armadura de disco, donde 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 puede expresar por la ecuación;

$$\omega = \omega_m (1 - e^{-t/T_m}) \quad \text{XLV}$$

donde ω_m , es la máxima velocidad y T_m , es la constante de tiempo del motor pero:

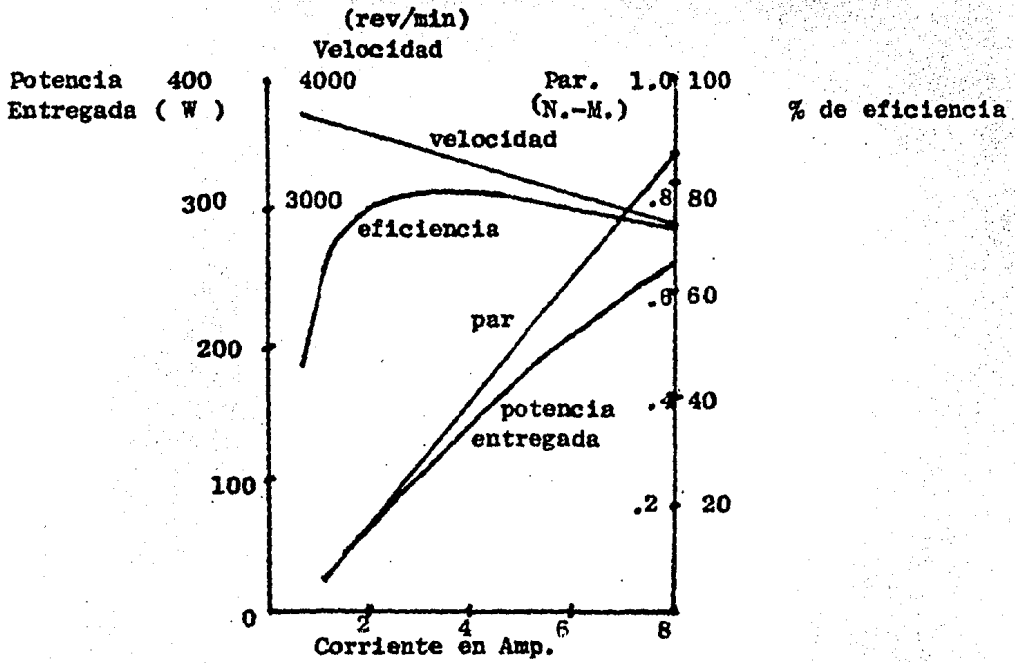


fig.4.6.1., Características de funcionamiento para un motor de c.c. de imán permanente de armadura de disco de baja Inercia.

$$T_m = (R_a \cdot J) / K_m^2, \text{ donde;}$$

XLVI

J=momento de inercia del motor y carga.

R_a =resistencia de la armadura.

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

Se han diseñado tambien, motores de imán permanente para aplicaciones domésticas, usando diodos rectificadores, motores para limpia vidrios éstos se diseñan con conmutador universal ya que estos proporcionan buena conmutación, -- permitiendo desarrollar altas velocidades y facilidad para -- controlarla. La fig.4.6.2., muestra un motor que tiene las siguientes características, potencia de 300 watts, velocidad de 17,500 rpm, voltaje aplicado de 240 volts de c.a., rectificando la senoidal principal.

En motores con baja inercia se usa imán permanente de Ferrita-Bario, esta aleación sustituye a las aleaciones metalicas, tiene baja densidad de campo pero es compensada por la alta capacidad de atracción que posee (coerción), -- que es un aspecto importante para el diseño de motores con armadura de disco que para una buena eficiencia se construyen -- con claros reducidos.

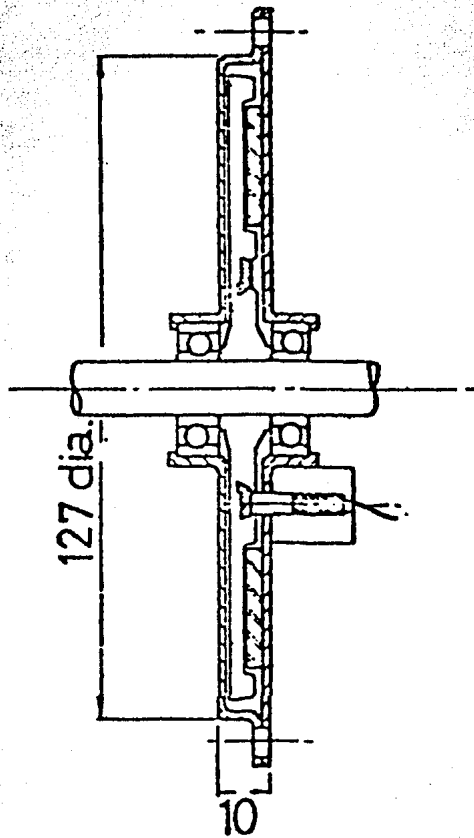


fig.4.6.2. Datos de Operación para un motor de c.c. de Imán Permanente, de armadura de disco.
Potencia, 300 Watts.
Velocidad, 17500 rev/min.
Voltaje, 240 volts.
(dimensiones en mm)

Este tipo de imán permanente con que se construyen no requiere magnetizarse, 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 éstos 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.

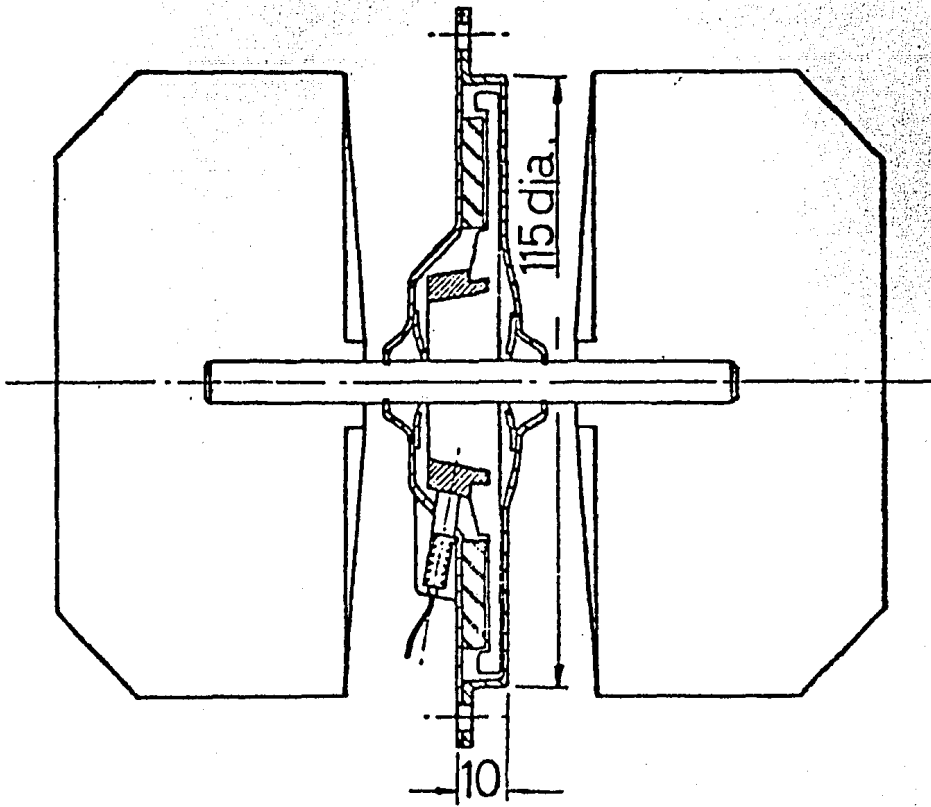


fig.4.6.3. Muestra un motor de c.c. de imán permanente usado con un impulsor gemelo en radiador de carro, con las sig. especificaciones, 12 volts, 66 watts y 4200 rev/min. (dimensiones en mm).

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

También son diseñados para usarse en sensores de posición y controladores, los cuales son operados en forma de interrupciones (switches) continuo, el switcheo hace que la frecuencia de rotación se salga un poco de la frecuencia normal de operación debido a que se hace presente una armónica en la corriente de armadura, la que tiende a cambiar el -- par del motor, el cambio se debe a la posición del rotor (armadura), pero este par oscilante es aceptable en algunas aplicaciones, se puede reducir empleando rotores que trabajen con algún sistema de salto pero también presenta desventajas en -- bajas velocidades, se usa en aplicaciones de control donde la posición depende del cambio del par lo que equivale a cambiar la ganancia del motor, se pueden hacer diseños apropiados a -- sistemas que tengan niveles bajos de par oscilante, teniéndose un par elevado en el rango de bajas velocidades.

5.- BIBLIOGRAFIA .

Autor; Siskind.

Título; Máquinas Eléctricas.

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

Autor; Leander W. Matsch.

Título; Máquinas eléctromecánicas 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.