Apuntes de Máquinas Eléctricas

GUÍA DE EQUIPO FEEDBACK MÁQUINA BÁSICA

Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Año 2002

Autores: David Watts C. y Juan Dixon

ACERCA DE ESTE DOCUMENTO

Este documento es el resultado del trabajo de distintas personas, cuyo aporte al documento final se describe a continuación:

La primera versión de esta guía fue realizada por el profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Chile, señor Juan Dixon.

Posteriormente, durante el año 2000, el Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Chile, señor David Watts C. trabajó en su digitalización y en la readecuación de sus contenidos para el curso IEE2272 Laboratorio de Máquinas Eléctricas, labor que desempeñó con la ayuda de la alumna Andrea Cordero.

Finalmente, durante el año 2001, gracias al concurso Fondo de Desarrollo de la Docencia FONDEDOC 2001, los profesores David Watts C. y Juan Dixon terminaron la actualización y readecuación de este documento, con la ayuda del ayudante Juan Francisco Araya y de los alumnos Tomás Cox, José Escobar y Miguel Angel Martínez.

ÍNDICE

ACERCA DE ESTE DOCUMENTO....2
ÍNDICE....3

I. TEORÍA DE LA MÁQUINA ELÉCTRICA BÁSICA....5
1 El Circuito Magnético....5
2 Conductor en un campo magnético....7
2.1 Efecto de motor....7
2.2 Efecto de generador....7
2.3 FEM Inducido....9
2.4 Campos Rotatorios....10
2.5 Conmutación y efecto armadura....12
2.6 Motor simplificado, Generador y ecuaciones de Torque....13

II. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO FEEDBACK....15
1 Instrumental....17
2 Panel de Control....19

III. MÁQUINAS REALIZABLES CON EL EQUIPO....22
1 Motor....22
2 Generador....23

IV. EXPERIENCIAS PRIMERA SESIÓN....24
1 Motor Universal....24
1.1 Trabajo de Laboratorio....24
2 Generador elemental AC/DC....29
2.1 Trabajo de Laboratorio....29
3 Motor de Inducción Espira de Sombra....33
3.1 Trabajo de Laboratorio....34

V. EXPERIENCIAS SEGUNDA SESIÓN....36
1 Motor de paso tipo reluctancia....36
1.1 Marco Teórico....36
1.2 Trabajo de Laboratorio....40
2 Cambio de Número de Pares de Polos....43
2.1 Marco Teórico....43
2.2 Trabajo de Laboratorio....47
3 Generador Brushless....51
3.1 Marco teórico....51
3.2 Trabajo en Laboratorio....52
4 Motor de Repulsión....55
4.1 Trabajo en Laboratorio....58

VI. EXPERIENCIAS RECOMENDADAS POR EL FABRICANTE..... 60
1 Flujo y circuito magnético de inducción "Modelo de distribución de energía eléctrica"..... 60
1.1 Trabajo en Laboratorio..... 61
2 Motor de Inducción trifásico..... 64
2.1 Trabajo en Laboratorio..... 64
3 Generador Síncrono trifásico..... 68
3.1 Trabajo en Laboratorio..... 70

I. TEORÍA DE LA MÁQUINA ELÉCTRICA BÁSICA

1 El Circuito Magnético

El circuito magnético de una forma de máquina eléctrica se muestra en la siguiente figura, esta muestra un camino de flujo aplicable a muchos motores y generadores de corriente alterna (AC) y corriente continua(DC), donde el flujo viaja en un circuito cerrado en que va del polo norte hacia el polo sur, volviendo a través del marco circundante. La excitación o fuerza magnetomotriz F, que permite manejar el flujo a través del circuito es desarrollada por las bobinas de campo y es proporcional al número total de giros T y la corriente I en cada giro. (ver Figura 4.1)

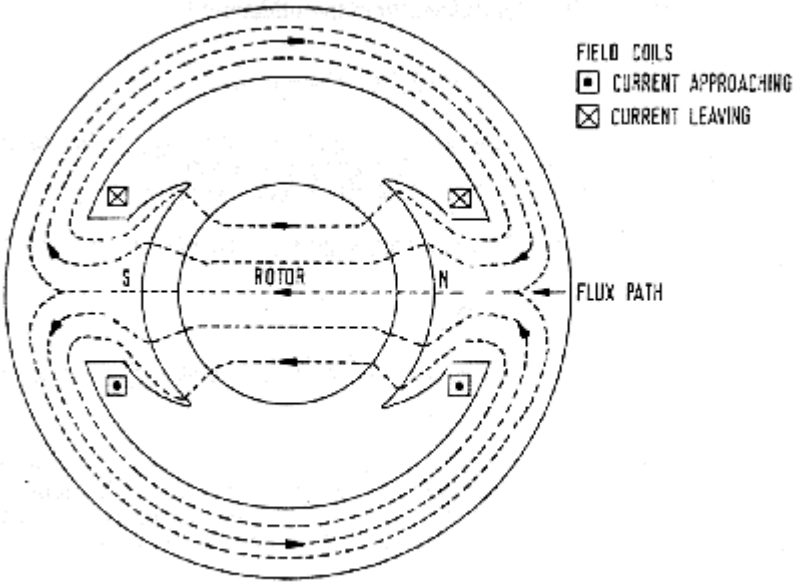


Fig 4.1 Magnetic Circuit of Electrical Machine

El valor de flujo que viaja por el circuito magnético es proporcional a la corriente de excitación e inversamente proporcional a la reluctancia total del circuito, Rm. La reluctancia es una medida de la oposición al flujo magnético de los materiales que forman el circuito magnético. La ecuación para el flujo es:

$$Flujo = \frac{Excitacion}{reluc\tan cia} \quad \text{o} \quad \phi = \frac{F}{Rm}$$

Donde:

ϕ = Flujo en webers (Wb)
F = Excitación (A)
Rm = Reluctancia (A/ Wb)

Esto es análogo al circuito eléctrico en que:

$$Corriente = \frac{Voltaje}{resisencia}$$

La reluctancia en cualquier parte del circuito magnético puede ser calculada por la ecuación:

$$Rm = \frac{1}{\mu} * \frac{l}{a}$$

Donde:
μ = permeabilidad absoluta del material
l = Largo del camino del flujo
a = corte del área particular

Esto se parece a la ecuación eléctrica para resistencia:

$$R = \rho \frac{1}{a}$$

Donde el inverso de la permeabilidad $\frac{1}{\mu}$ es análogo a la resistividad ρ.

La reluctancia total del circuito magnético es la suma de las reluctancias de cada sección, polos, etc. y el flujo en el circuito es dependiente de la corriente de excitación y de la reluctancia total. En general, el flujo nivela en partes diferentes del circuito el que lleva una relación simple, es decir el flujo en el polo es dos veces mas que en una sección del marco. Sin embargo, en algunas secciones el efecto de perdida magnética tiene que ser tenido en cuenta. Uno de éstos es la región alrededor del polo, donde un poco de flujo fluirá al marco o a un polo adyacente. El factor de perdida se expresa como:

$$\frac{Flujototal}{Flujoutil} = \frac{Flujoutil + Perdidaflujo}{flujoutil}$$

Un valor típico es 1,2.

2 Conductor en un campo magnético

2.1 Efecto de motor

Un conductor que lleva una corriente I produce líneas concéntricas de flujo magnético, como es mostrado en la figura. La regla de la mano derecha puede usarse para mostrar la dirección de flujo. En este caso el dedo pulgar representa la dirección de corriente y los dedos el flujo que rodea al conductor.

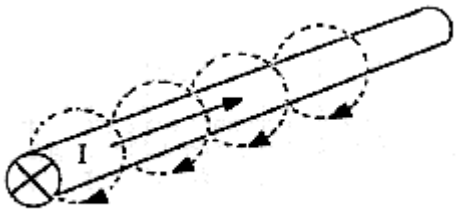


Fig 4.3

Si el conductor de longitud L se encuentra perpendicular a un campo magnético de densidad de flujo B, la interacción entre el flujo debido a la corriente I en el conductor y el campo causan una fuerza F en el conductor, dada por la ecuación:

$$F = B \cdot I \cdot L[Newton]$$ (Ver figura 4.4)

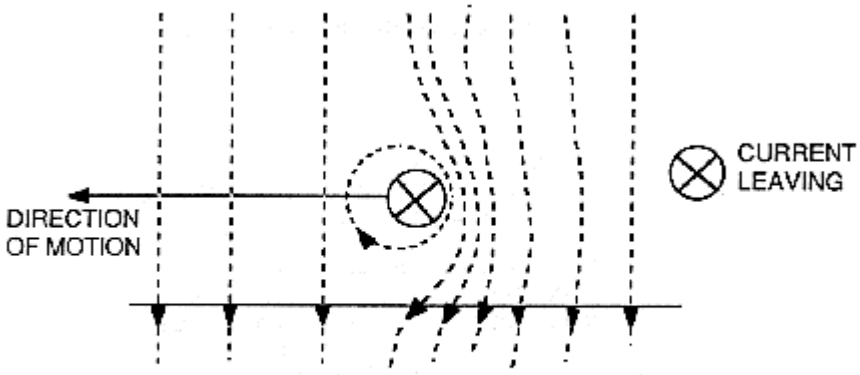


Fig 4.4 The direction of motion of the conductor relative to the field and the current flow.

2.2 Efecto de generador

Si el conductor, no conectado a una fuente de poder externa, se mueve a través de un campo magnético producto de la aplicación de una fuerza externa, una Fem(Fuerza Electro-Motriz) se inducirá entre los extremos del conductor, proporcional a la proporción a la que son cortadas las líneas de flujo, tal como se aprecia en la figura 4.5.

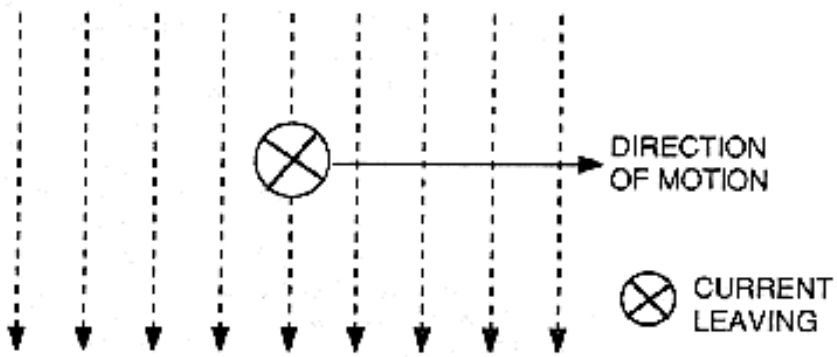


Fig 4.5 Generator Effect

la magnitud del voltaje generado es

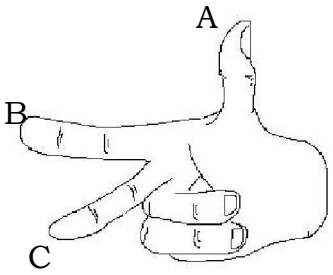
$$E = \frac{\phi}{t} volts$$

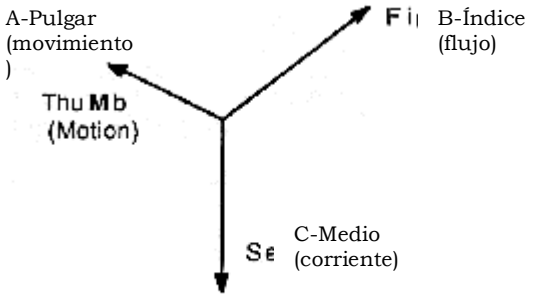
Donde:
ϕ= flujo de corte del generador Wb
t = tiempo en segundo
Pero se sabe que $\phi = densidad_de_flujo \bullet area_corte_conductor$

$$E = \frac{Ba}{t} = Blv$$

Donde:
B = densidad magnética
l = largo activo conductor
v = Velocidad del conductor

Con el conductor conectado a una carga externa, la dirección de flujo actual es dada por la Regla de la mano derecha de Fleming. Esta regla nos dice que si ponemos nuestros dedos pulgar, índice y medio de forma perpendicular entre ellos, el dedo pulgar muestra la dirección de movimiento, el dedo índice la dirección de flujo y el dedo medio da la dirección de flujo actual (corriente). Las siguientes figuras muestran la posición de los dedos y lo que representan:





Si el rotor del Generador Elemental de Máquina se maneja a 300r/min y su diámetro es 0.1 metro, la velocidad de cada conductor es:

$$r \times \frac{0.1 * 300}{60} m/s$$

Ahora, tomando la longitud activa bajo los polos de 1/30 metro, y la densidad de flujo en el entrehierro como 0.7 Tesla, el voltaje generado por conductor es:

$$0.7 * \frac{\pi}{10} * \frac{300}{60} * \frac{1}{30} = 0.037 volts$$

Los cuatro conductores que forman el enrollado de dos giros generarían 0.148 voltios bajo estas condiciones.

2.3 FEM Inducido

Cuando el flujo a través de un enrollado aumenta o disminuye, un Fem es inducida en el enrollado que es proporcional a la proporción de cambio de flujo. La magnitud de esta Fem es:

$$E = \frac{\phi}{t} \times T volts$$

Donde:
ϕ = cambio de flujo (Wb).
t = tiempo (seg.)
T = nº de vueltas en el enrollado
E = Fem. media

Hay muchas formas diferentes para poder cambiar el nivel de flujo en un enrollado, los cuales pueden resumirse como:

1. El movimiento relativo entre un enrollado y un sistema magnético rotatorio de máquinas eléctricas son ejemplos de esto. En un

generador de a.c convencional se invierte el flujo en cada enrollado del estator continuamente. El efecto de variar el flujo a través del enrollado puede ser demostrado conectando una bobina a un centro sensible, luego poniendo en cero un mili voltímetro y pasando un imán rápidamente al centro del enrollado. Como el flujo que une el enrollado aumenta, el Fem. es inducido en él causando en el mili voltímetro una desviación en una dirección. Cuando el imán se retira se invierten la Fem. Inducida y se desvía el mili voltímetro en dirección contraria.

2. Un cambio de corriente causa en el enrollado primario una inducción de Fem. en el enrollado secundario que se acopla magnéticamente a él. En un transformador la bobina primaria se conecta a una fuente de corriente alterna, produciéndose un flujo magnético alterno. Esto produce una Fem inducida en la bobina secundaria que alterna a la misma frecuencia como el suministro. En un transformador ideal, sin perdida de flujo entre los bobinados, con enrollados de cero resistencia, etc. la relación entre el voltaje del primario y del secundario es:

$$\frac{Vs}{Vp} = \frac{Ts}{Tp}$$

y entre la corriente primaria y la corriente de carga secundaria es:

$$\frac{Is}{Ip} = \frac{Tp}{Ts}$$

Es por esto que los transformadores tienen en los enrollados un centro hecho de un material del ferromagnético, como acero de silicón. Esto da al circuito magnético una reluctancia baja con perdida de flujo despreciable. El efecto de resistencia, reactancia, etc. no son despreciables pero son suficientemente pequeños dentro del rango de carga del transformador para que se cumplan las relaciones anteriores.

2.4 Campos Rotatorios

Cuando el enrollado de campo de una máquina eléctrica se energiza de una fuente monofásica en que la polaridad del campo magnético resultante alternará, entonces el camino tomado por el flujo no cambiará. Si los bobinados del campo se colocan de manera que ellos pueden conectarse a un suministro polifásico en que el campo magnético será ahora de magnitud fija pero rotará a una velocidad determinada por la frecuencia del suministro y el número de polos de la fase.

En la figura 4.7 un estator trifásico de enrollado A-A ', B-B ', C-C ' se conecta a un suministro trifásico. Hay dos polos por fase y los dos enrollados de cada fase se conectan en serie. El gráfico en la parte más baja del diagrama muestra un ciclo completo del suministro de las tres fases, y pueden leerse los valores de corriente en cada fase fuera de este gráfico a cualquier punto por el ciclo.

Las secciones del estator en la parte superior del diagrama muestran los modelos de flujo para seis puntos del ciclo. Las corrientes yendo a Positivo se toman para fluir de A a A', B a B', C a C', corrientes yendo a negativo de A' a A, etc. atrayendo la dirección de corriente en cada bobinado a cualquier punto del ciclo; la dirección de flujo en cada polo puede determinarse mediante la regla de la mano derecha y puede asumirse que cada enrollado se enrolla en la misma dirección. En este diagrama una aguja del compás muestra la dirección del flujo en cada caso y se ve que se vuelve a través de una revolución completa durante un ciclo del suministro eléctrico.

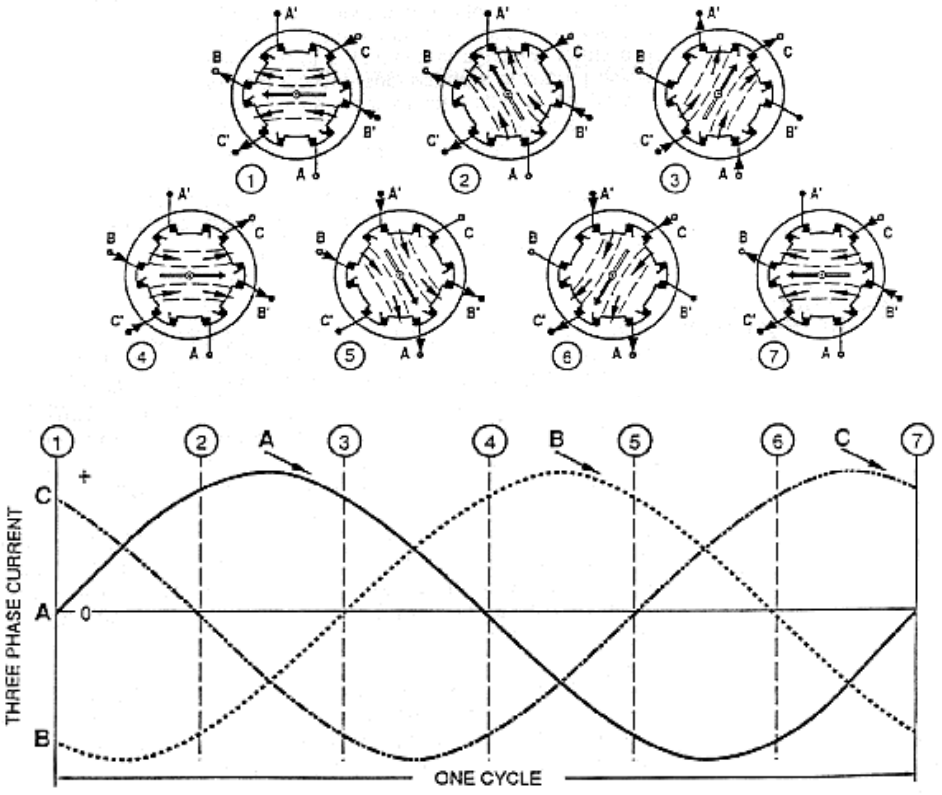


Fig 4.7

La velocidad del campo magnético desarrollado por los bobinados del estator de una máquina de rotor polifásico esta dada por la ecuación:

$$n = \frac{f}{p} * 60$$

La mayoría de las máquinas polifásicas eléctricas son bifásicas o trifásicas, aunque se usan sistemas con seis o más fases. El motor de inducción monofásico se pone en marcha a menudo como una máquina de dos fases y puede funcionar como de una. En este caso una de las dos bobinas del estator se conecta al suministro vía un condensador que produce una diferencia de fase en las corrientes a través de los dos embobinados. Alternativamente los enrollados de salida pueden tener alambre de diámetro pequeño que se usan en el embobinado principal aumentando su componente resistiva y produciendo el cambio de fase requerido.

2.5 Conmutación y efecto armadura

En el generador elemental dc mostrado alternadamente en la Figura 4.8, cada paso del enrollado de armadura bajo el polo Norte y el polo Sur genera una Fem que alterna en polaridad. Para producir un rendimiento uni-direccional en los términos del generador un conmutador se usa para invertir las conexiones del enrollado cuando las Fem. se indujeron en él y pasan por cero. Esto ocurre cuando los lados del enrollado están en el neutro magnético (MNP).

El campo principal es torcido por un flujo debido a carga que fluye actualmente en una bobina de la armadura de enrollados múltiples, y el neutro magnético se cambia lejos del neutro geométrico (PNB) por una cantidad que es dependiente en la fuerza de la corriente de la armadura.

Para obtener una conmutación buena es necesario mover los cepillos para que la conmutación ocurra de nuevo en el neutro magnético, o para producir un flujo magnético adicional para compensar esa deuda a la reacción de la armadura.

Cambiar los cepillos tiene la desventaja que cada valor de corriente de carga requiere poner un cepillo particular, aunque en la práctica pueden usarse.

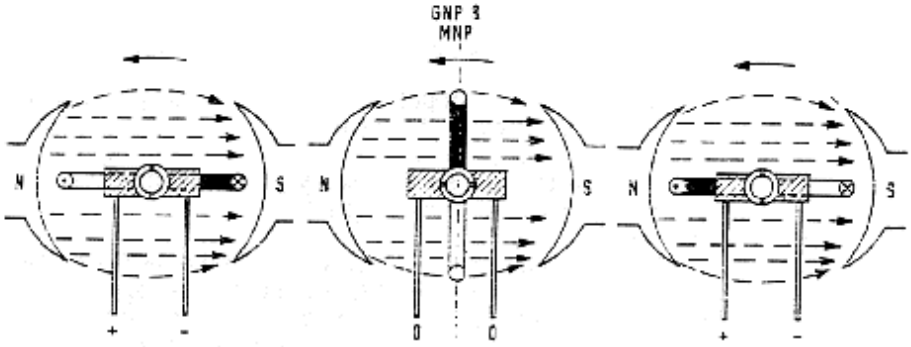


Fig 4.8 Commutation in Generator armature coil

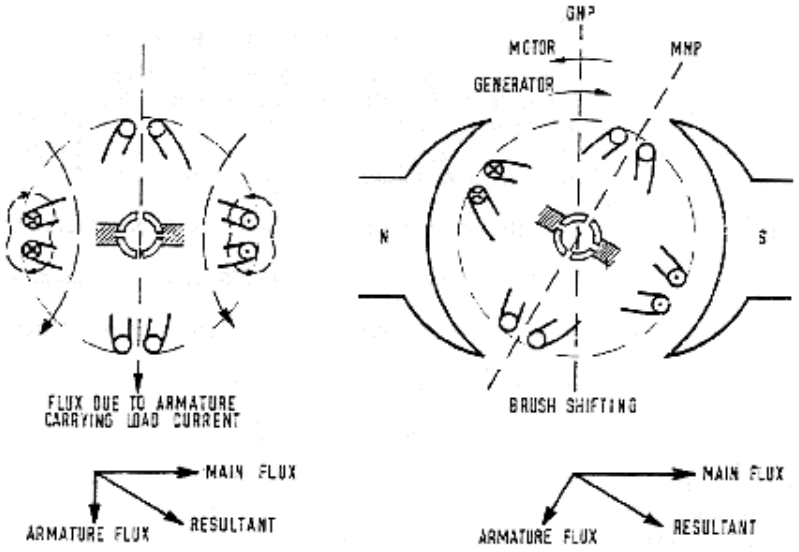
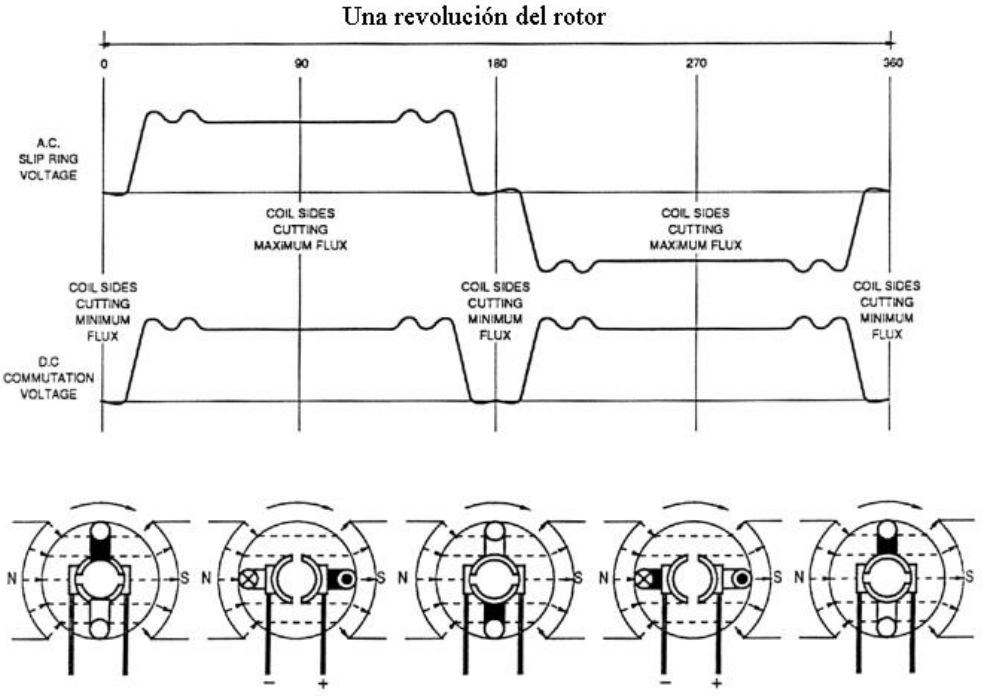


Fig 4.9 Field distortion due to armature reaction

Un método de producir un flujo para neutralizar esa deuda a la reacción de armadura es poner interpolos en el campo principal y conectar los enrollados del interpolo en serie con la armadura. Así se mejorará la conmutación, sin cambiar los cepillos, encima del rango de carga de la máquina.

2.6 Motor simplificado, Generador y ecuaciones de Torque

Hay mucho que puede predecirse sobre el comportamiento de motores y generadores, sobre todo del tipo dc, por la aplicación de ecuaciones simplificadas que relacionan la velocidad, la fem, corriente del campo, corriente de la armadura, resistencia de la armadura y torque. Estas ecuaciones se entienden fácilmente y usan factores constantes para tener en cuenta los efectos complejos de perdida de flujo magnético, cobre y pérdidas férricas, etc.



Funcionamiento del Generador Elemental

Las tres ecuaciones importantes de recordar son:

$$V = K_1 N\phi - I_a R_a$$ Ecuación de Generador

$$V = K_1 N\phi + I_a R_a$$ Ecuación de Motor

$$T = K_2 I_a \phi$$ Ecuación de Torque

II. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO FEEDBACK

El equipo está diseñado y construido de manera de ser un instructivo de los principios básicos de funcionamiento y de construcción de un amplio espectro de máquinas eléctricas.

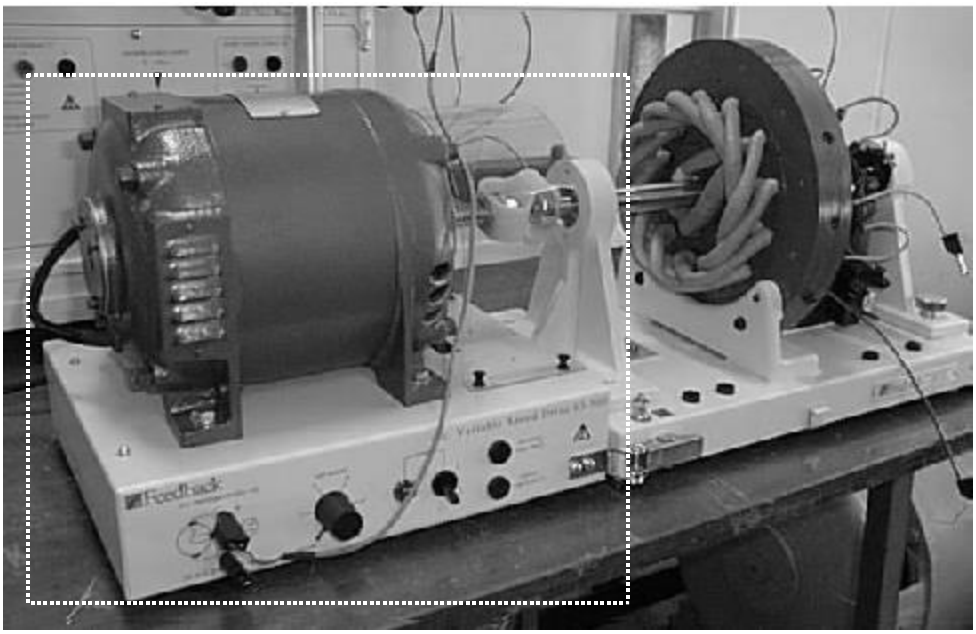
Este equipo de divide en 3 partes:

1.- EMT 180, TUTOR DE MAQUINAS ELÉCTRICAS

Comprende un completo kit de componentes ensamblables entre los que se cuentan ejes, polos, bobinas, escobillas, etc. Se reproducen en las siguientes figuras:

2.- MTK 181, KIT DE MÁQUINAS DE PRUEBA

Motor de velocidad variable VSD 177 ilustrado en la figura. Este motor es la unidad motriz de las experiencias con generación, y es un motor shunt con control de velocidad.



Freno / Torquímetro PB 184, disponible como un freno de tambor, se utiliza para hacer todas las pruebas de torque resistente.

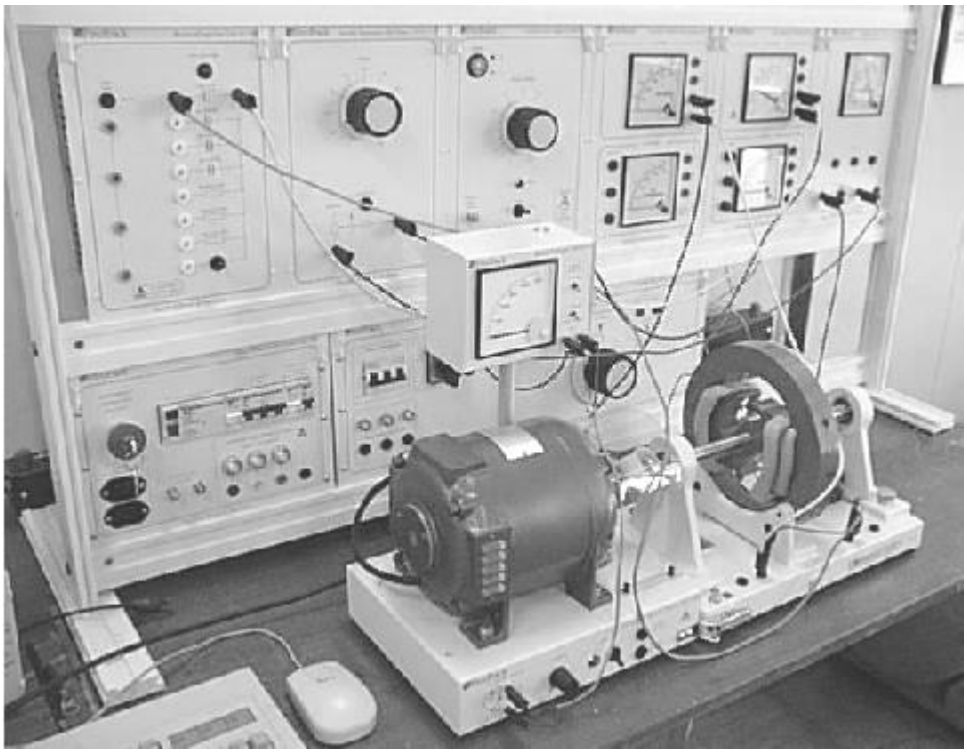
Portaescobillas de ángulo variable RB 185, permite realizar experiencias con colector y estudiar entre otras las reacciones de armadura y el performance de conmutación.

3.-MCP 182, PANEL DE CONTROL:

El panel de control general del equipo se dispone en forma modular, posee una barra de conexión en su parte posterior en donde se conectan los terminales de tierra y los módulos energizados.

Contempla diversas fuentes de poder de voltaje variable tanto AC como DC, trifásica, monofásica y continua. Incluye instrumentos de medición, voltímetro, amperímetro, wattmetro para corrientes continua y alterna, además de frecuencímetros. Incluye también un medidor trifásico digital, que es capaz de tomar variables trifásicas como: voltaje, corriente, potencia activa, reactiva y aparente; factor de potencia y frecuencia.

Dispone también de cajas especialmente diseñadas para las experiencias, como interruptores de control, resistencia variable, sincronizador trifásico, caja de condensadores y resistencias.

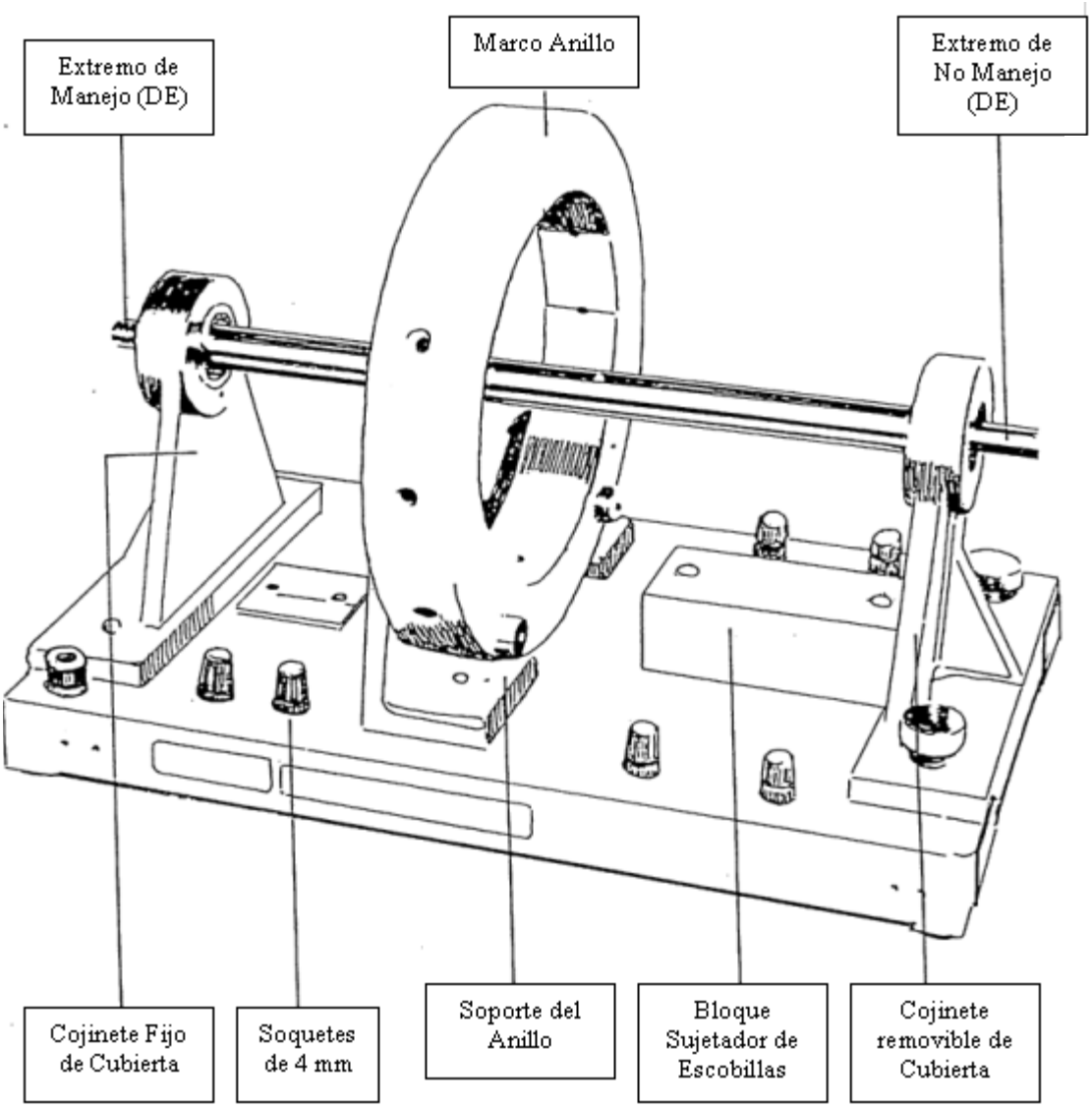


Es necesario advertir que a pesar de tener una presentación uniforme y segura, las variables como voltaje y corriente empleadas no son despreciables, por lo que antes de realizar cualquier operación consulte al encargado del laboratorio.
Recordar que las tensiones de alimentación del equipo son las tensiones trifásicas de la red.

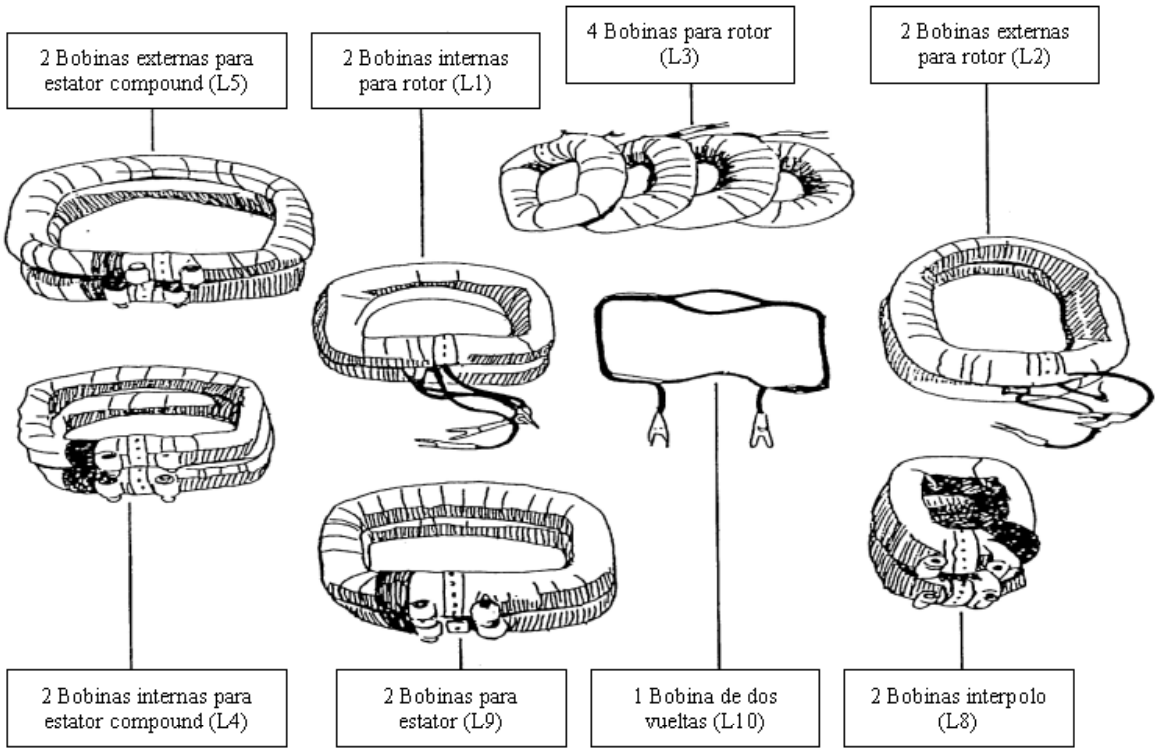
1 Instrumental

La maquina básica Feedback cuenta con la siguiente instrumentación

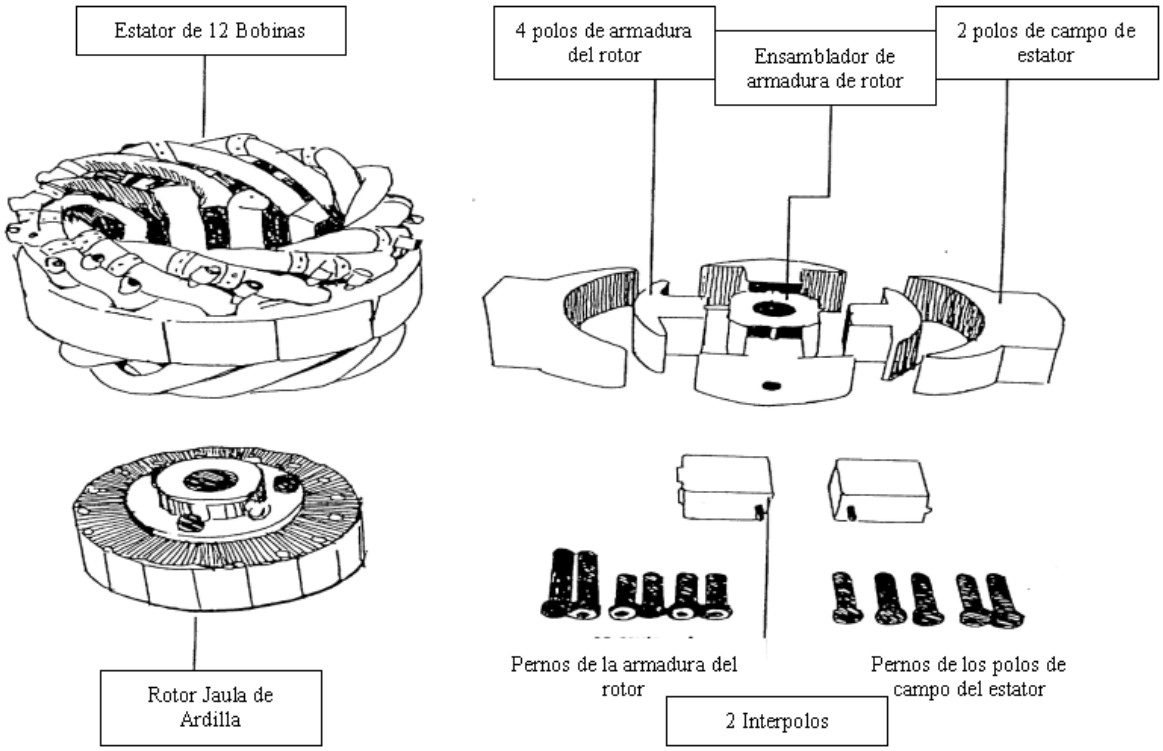
La estructura esta dada por



Dentro de esta armadura se pueden armar distintos tipos de motores y generadores, contando para ello con las siguientes piezas:



Estas son los diferentes tipos de bobinas, además cuenta con diferentes piezas para hacer el rotor



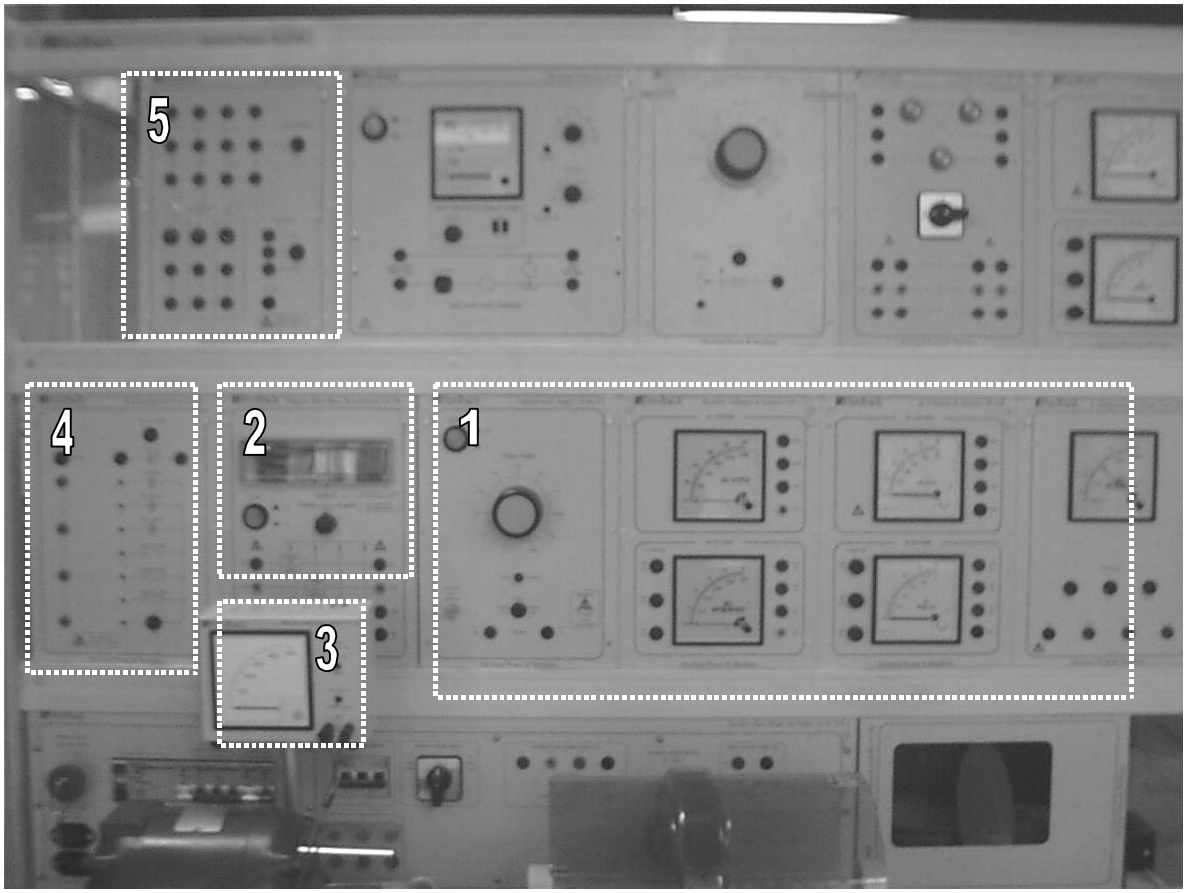
2 Panel de Control

Es importante manejar algunos conceptos básicos del panel del control para empezar a utilizarlo. En la siguiente imagen se muestra el interruptor de apagado / encendido del panel:



Consta de una llave y varios interruptores los cuales deben estar todos arriba para que el panel este alimentado. El interruptor negro de la izquierda es el principal.

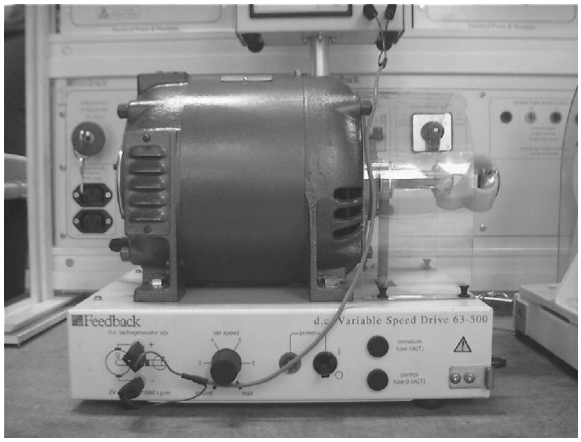
En la siguiente vista general se describen algunas de las opciones que trae el panel del equipo Feedback



1. Sector de fuentes DC y AC: en esta parte del panel se tienen las salidas de la fuentes alterna y continua, la medición del voltaje y las corrientes y el respectivo control de amplitud (perilla). Los voltímetros y amperímetros tienen fusibles a sus costados. Es importante al reemplazarlos si es necesario, fijarse en que correspondan a la magnitud de la variable medida (ej: 5 [A] o 10 [A]).

2. Mediciones de variables alternas y trifásicas: con este dispositivo se puede medir la frecuencia, desfase y secuencia de las tres fases que se le ingresan. Por ejemplo, pueden utilizarse para medir los voltajes generados por el generador trifásico de síncrono.

3. Velocidad de Giro del Motor Auxiliar: Este panel muestra la velocidad que alcanza el motor auxiliar. En la siguiente imagen se pueden ver los terminales y controles del motor:

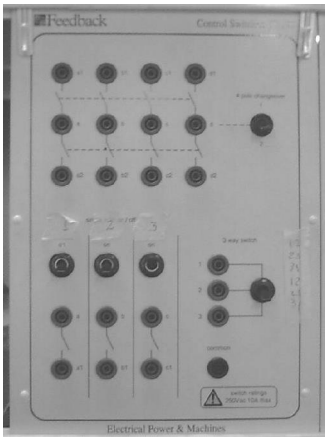


Se alimenta enchufándolo a la red con un cable similar al de los PC y se deben conectar sus terminales al medidor de velocidad, como se muestra a la izquierda abajo. El interruptor on / off se acompaña de una luz que indica la condición y el control de velocidad (perilla) a su costado. A la derecha se encuentran los fusibles de armadura (arriba 5 [A]) y de control (abajo 0.5 [A]).

4. Condensadores y Resistencias disponibles: en este sector se cuenta con terminales que tienen entre ellos condensadores y resistencias de distintos valores que se utilizan por ejemplo para los métodos de partida del motor de inducción.

5. Interruptores normales y “3 way”: Estos interruptores permiten cortar el paso de corriente entre dos terminales. Se dispone de 3 interruptores normales y uno secuencial que se maneja a través de

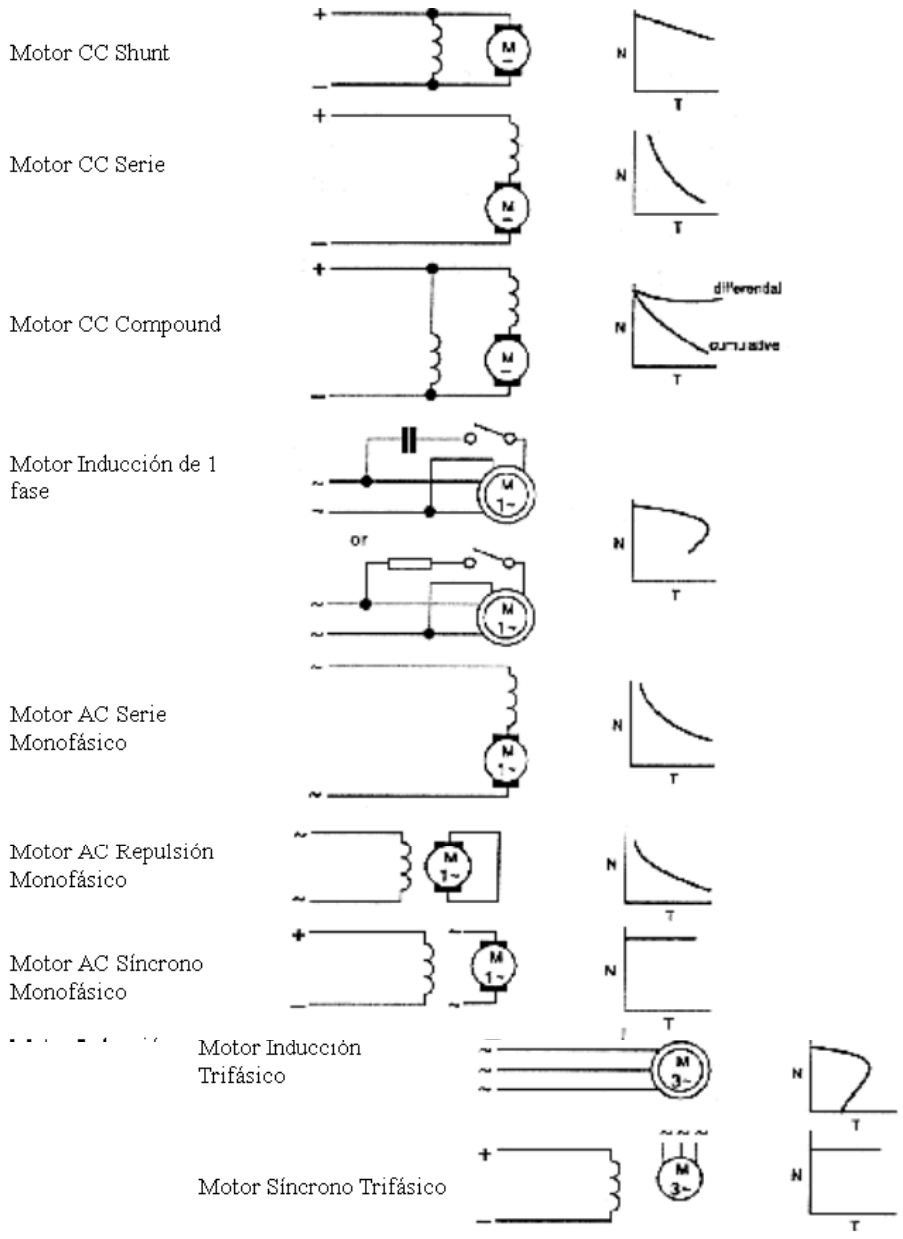
una perilla. Este último tiene tres entradas al igual que el set de normales.



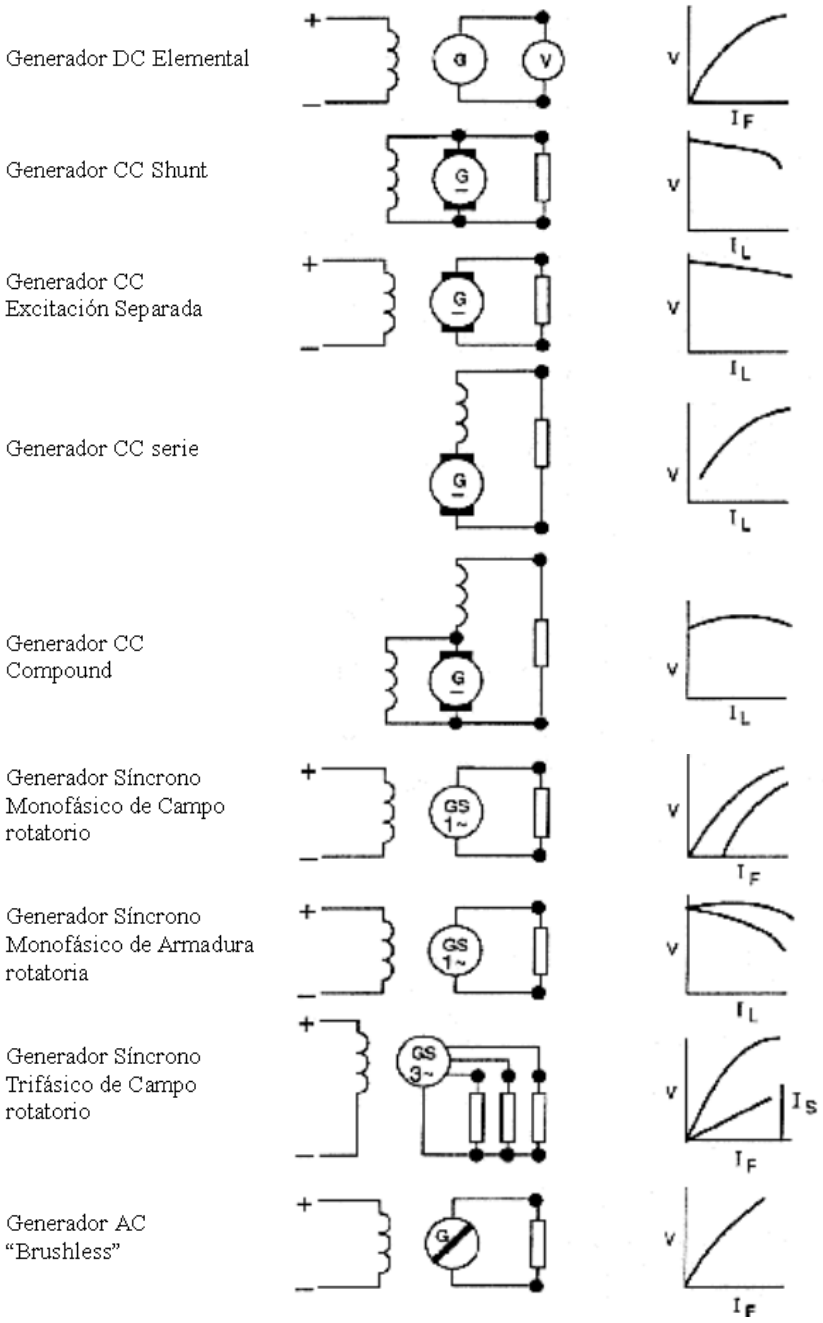
III. MÁQUINAS REALIZABLES CON EL EQUIPO

Resumen de las características relevantes de las maquinas que se pueden armar.

1 Motor



2 Generador


Generador DC Elemental
A
V
V
I_F
Generador CC Shunt
G
V
I_L
Generador CC
Excitación Separada
G
V
I_L
Generador CC serie
G
V
I_L
Generador CC
Compound
G
V
I_L
Generador Síncrono
Monofásico de Campo
rotatorio
GS
1~
V
I_F
Generador Síncrono
Monofásico de Armadura
rotatoria
GS
1~
V
I_L
Generador Síncrono
Trifásico de Campo
rotatorio
GS
3~
V
I_S
I_F
Generador AC
"Brushless"
G
V
I_F

IV. EXPERIENCIAS PRIMERA SESIÓN

El objetivo de esta primera sesión, es familiarizarse con la maquina básica feedback, realizando algunas experiencias básicas, se deberá armar los motores para así realizar las experiencias, no se requieren conocimientos específicos de las maquinas a armar.

1 Motor Universal

El motor serie monofásico, tiene el mismo diagrama de conexión que el de corriente continua, es decir, posee un colector y las bobinas de estator y rotor conectadas en serie, pero es importante observar que al estar alimentado por corriente alterna, requiere de fierro laminado en su construcción, para disminuir el efecto de corrientes parásitas. Este motor muestra características de operación como, torque elevado a baja velocidad, puede ser usado a altas velocidades, y en aplicaciones de velocidad variable. Entre las aplicaciones más corrientes se pueden mencionar ventiladores, herramientas, aspiradoras, máquinas de coser, etc.

1.1 Trabajo de Laboratorio

1.1.1 Materiales

Estator:	Instrumentos y equipos:
2 Polos de Campo	1 Fuente 135V AC monofásica (60 - 121).
2 Portaescobillas	1 Fuente 1-100V / 5A DC
2 Bobinas L9	1 Voltímetro AC 0-200V (68 - 117)
1 Colector / Anillos	1 Amperímetro AC 5-10A (68 - 117)
Rotor:	1 Amperímetro DC cero central 5-0-5A
2 Bobinas L1	(68 - 113)
2 Bobinas L2	1 0-150V DC voltímetro (68-110)
1 Rotor cilíndrico de 4 polos.	1 0-5A DC amperímetro (68-100)
	1 Tacómetro
	1 Freno de tambor (PB184)

1.1.2 Experiencia

Realizar las siguientes conexiones tanto para rotor como para el estator

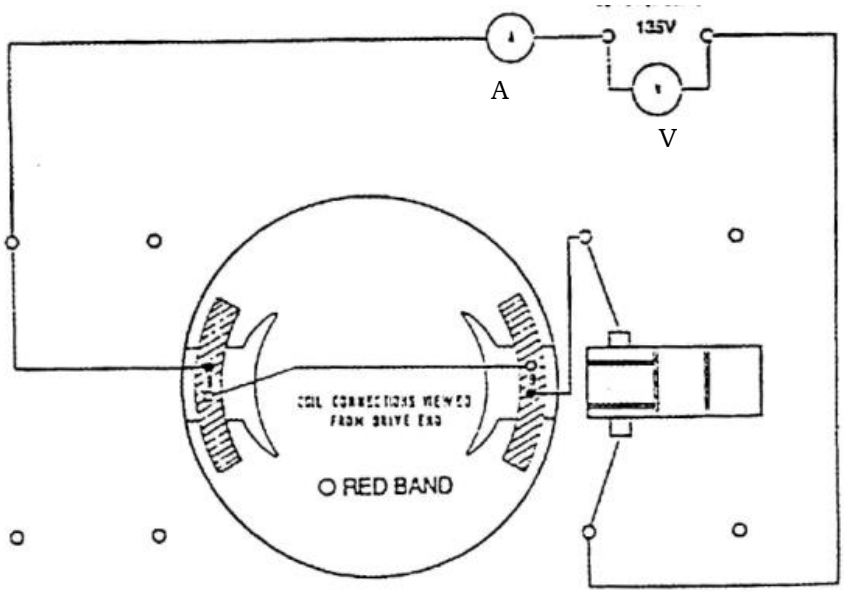


Diagrama de Conexiones de un Motor AC serie. Bobinas Concentradas

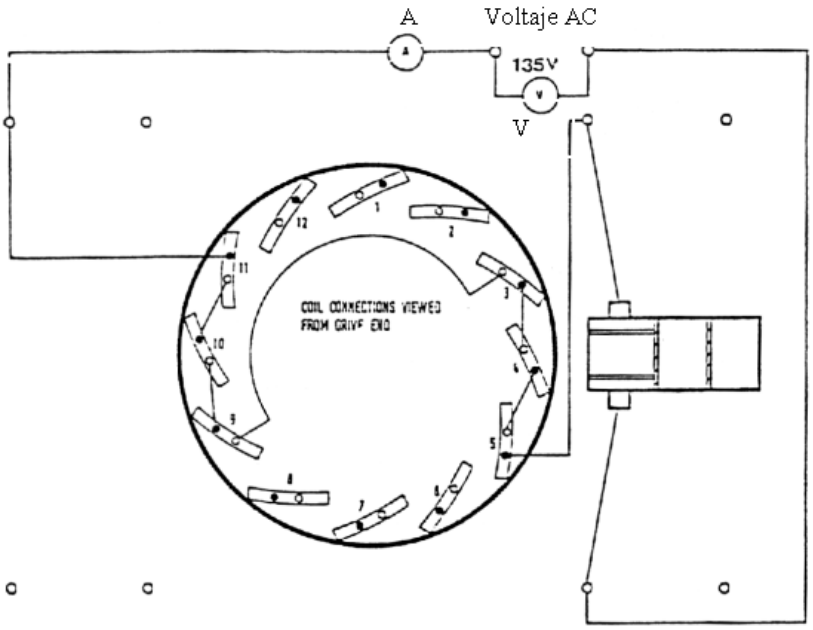


Diagrama de Conexiones de un Motor AC serie. Bobinas Distribuidas

Y el rotor se hará de la siguiente forma, siguiendo paso a paso las instrucciones de la figura

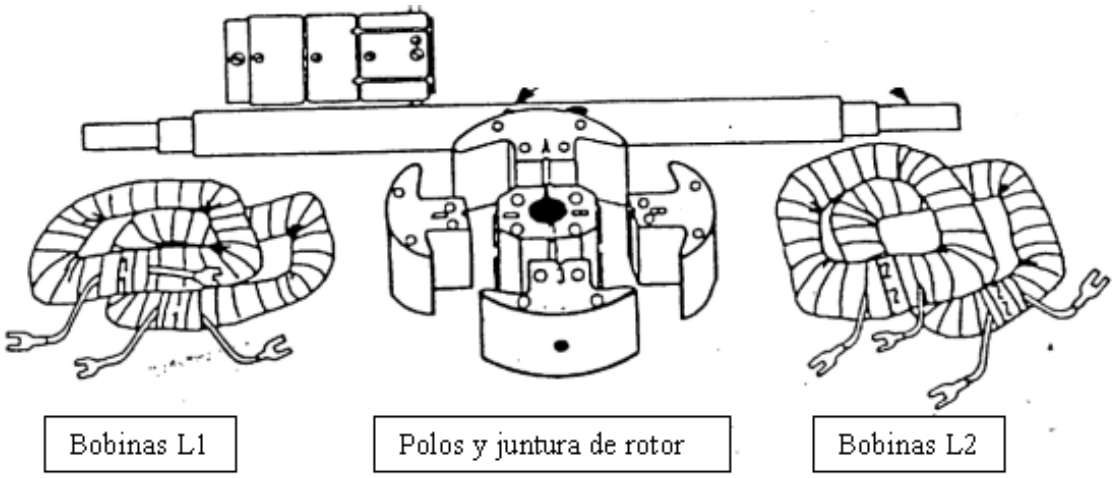


Fig 3.1a

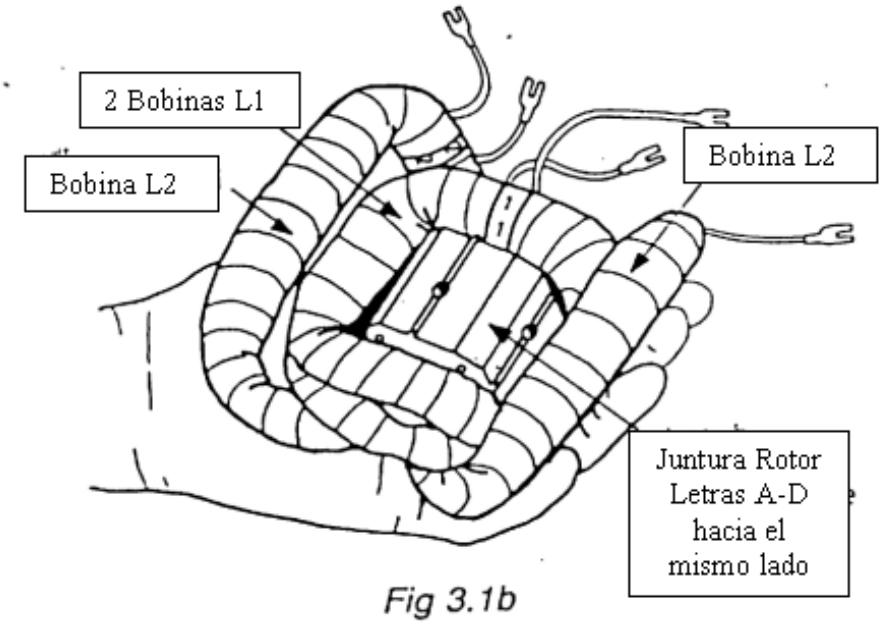
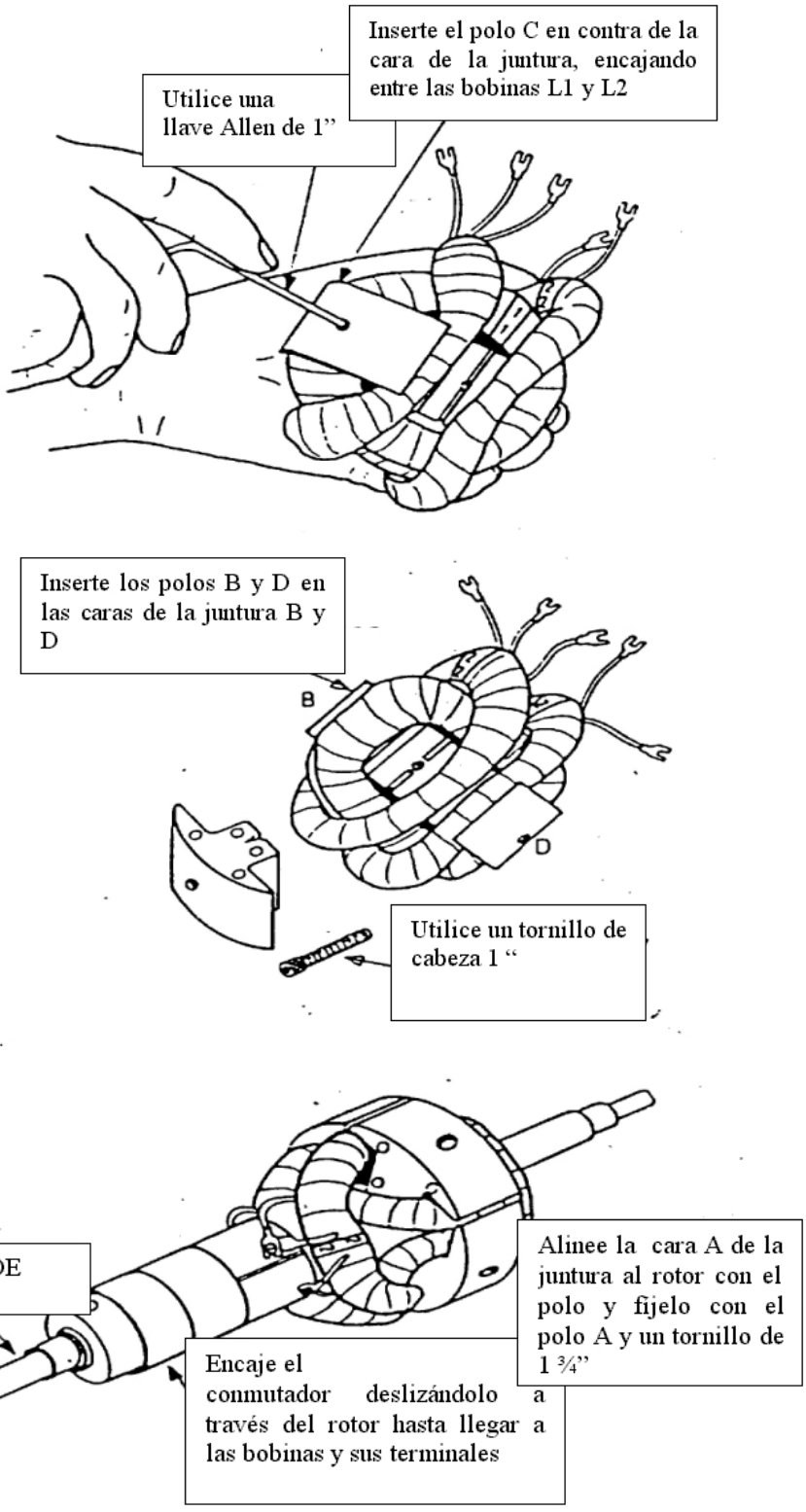
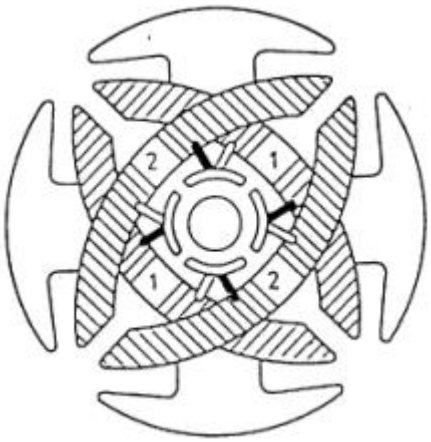


Fig 3.1b


Inserte el polo C en contra de la cara de la juntura, encajando entre las bobinas L1 y L2
Utilice una llave Allen de 1”
Inserte los polos B y D en las caras de la juntura B y D
B
D
Utilice un tornillo de cabeza 1 “
NDE
Alinee la cara A de la juntura al rotor con el polo y fíjelo con el polo A y un tornillo de 1 ¾”
Encaje el conmutador deslizándolo a través del rotor hasta llegar a las bobinas y sus terminales

quedando frontalmente...



1.1.3 Alimentación alterna

1-. Completadas las conexiones de la máquina encienda el suministro de 135V A.C, en condiciones de funcionamiento estacionarias mida la corriente de entrada y la velocidad.

2-. Con el torquímetro (freno): grafique Torque - Velocidad, Torque - Corriente de Armadura, Torque - potencia de Salida, torque - eficiencia

Alimentación continua

Este ensamblaje puede operar de manera segura, sin peligro de embalamiento, con voltaje máximo de 30V.

Nota Importante: No aumente el voltaje indiscriminadamente sin una carga en el eje, el motor puede embalarse peligrosamente.

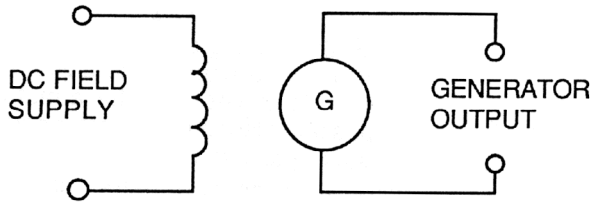
Motor en Vacío: conecte la alimentación continua y aplique un voltaje de 15V, el motor girará aprox. a 500 rpm.

Motor con Carga: acople el freno de tambor al eje y eleve el voltaje a 50V, manteniéndolo constante, tome nota de la corriente de armadura y velocidad variando el torque resistente. Grafique Torque - Velocidad, Torque - Corriente de Armadura, Torque - Potencia de Salida y Torque - eficiencia.

Por último compare el rendimiento y control de velocidad de ambas máquinas, comente las diferencias de desempeño, tomando en cuenta por un lado, el efecto de conmutación y por otro la impedancia de las bobinas.

2 Generador elemental AC/DC

Un conductor moviéndose a través de un campo magnético genera un voltaje que es proporcional a sus dimensiones, a la velocidad que corta el campo y la intensidad del campo aplicado.



Circuit Diagram–Elementary Generator

En este generador el voltaje producido por la rotación de la bobina de 2 espiras en un campo magnético es muy bajo, pero lo suficiente para deflectar la aguja del milivoltímetro conectado a los terminales de la bobina.

Esta experiencia ilustra este concepto fundamental del electromagnetismo, y se desarrolla como experiencia introductoria al estudio de máquinas eléctricas más complejas.

2.1 Trabajo de Laboratorio

2.1.1 Materiales

Estator:	Instrumentos:
2 Polos de campo 2 Bobinas L9 2 Portaescobillas Rotor: 1 Rotor cilíndrico (4 polos) 1 Bobina L10 de 2 vueltas 1 Colector/Anillos 1 Manivela	1 Motor de velocidad variable Feedback VSD177. 1 Fuente Variable 0-12 V DC. (Feedback 60-121). 1 miliamperímetro cero central (Feedback 68-113). 1 Amperímetro 0-5 A (Feedback 68-110). 1 Voltímetro 0-50V DC (Feedback 68-110). 1 Osciloscopio

2.1.2 Experiencia

Para esta experiencia se necesitara realizar la siguiente conexión

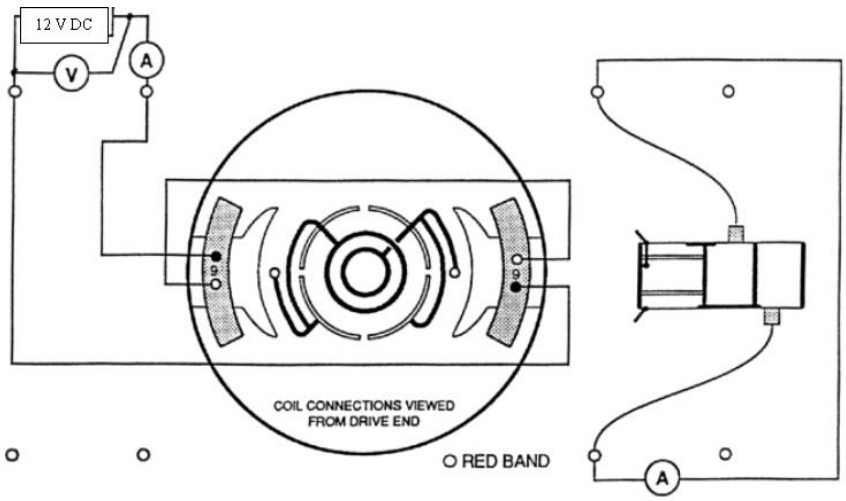


Diagrama de Conexiones de un Generador Elemental

2.1.3 Generador AC

Ajuste la tensión de la fuente DC de modo que la corriente de campo esté cercana a 2[A].

Con las escobillas sobre los **anillos rozantes**, y, gire la manivela acoplada al extremo libre del eje.

Observe la deflexión alternada de la aguja en el miliamperímetro, mientras aumenta la velocidad de giro. Observe que la deflexión es en un sentido mientras una cara de la bobina enfrenta el polo Norte del campo, y en el opuesto mientras la cara atraviesa el polo sur.

Acople el motor, en reemplazo de la manivela y ajuste su velocidad cercana a las 500 rpm.

Conecte un osciloscopio a la salida de las escobillas y observe la forma de onda inducida.

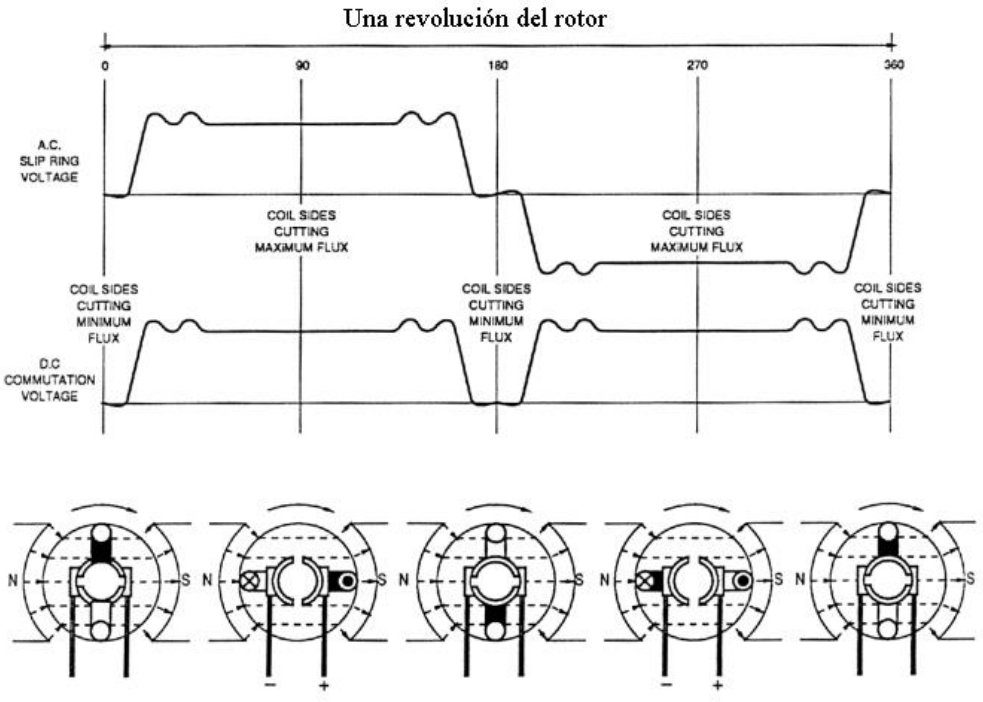
2.1.4 Generador DC

Con las escobillas sobre el **colector** (delgas) repita lo anterior y observe la polaridad de la corriente.

Gire la manivela en sentido opuesto y observe el cambio de polaridad.

Acople el motor, en reemplazo de la manivela y ajuste su velocidad cercana a las 500 rpm.

Conecte un osciloscopio a la salida de las escobillas y observe la forma de onda inducida.



Funcionamiento del Generador Elemental

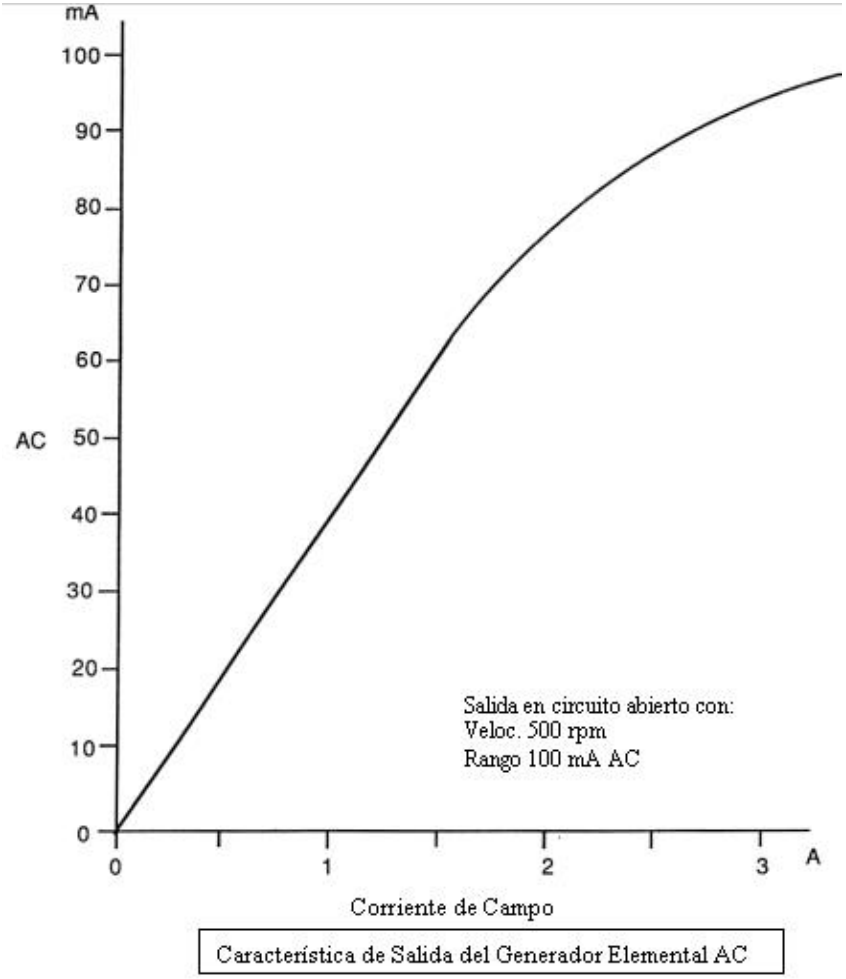
2.1.5 Curva de Magnetización

Disponga las escobillas de acuerdo a la primera conexión, es decir con salida alterna sobre los anillos.

Reemplace el amperímetro de cero central por uno de 0-100 mA AC, acelere el motor a 500 rpm.

Varíe la corriente de campo entre 0-3 A, midiendo la corriente de salida. Grafique determinando la curva de magnetización.

Se sabe que la curva de magnetización teóricamente tiene la siguiente forma



Característica de Salida del Generador Elemental AC

Por lo que se recomienda tomar mediciones y comparar la curva resultante con la teórica, saque sus propias conclusiones.

3 Motor de Inducción Espira de Sombra

En un motor de inducción monofásico no se dispone del campo rotatorio que se presenta para el caso trifásico. Tratándose de una fase, el campo magnético es pulsatorio lo que no permite que el motor de inducción monofásico pueda arrancar por sí mismo. Más aún en esta situación, el motor monofásico está indiferente al sentido de giro, el cual si se produce el arranque quedará determinado por el sentido de la fuerza inicial que lo sacó del equilibrio inestable. Se hace necesario entonces la implementación de un campo magnético auxiliar desfasado en ángulo geométrico y eléctrico del fundamental de forma de producir un campo rotatorio que logre hacer partir en un determinado sentido al motor monofásico.

Para este efecto se utilizan el método capacitivo y resistivo, los que son diseñados para operar a la partida, para luego ser desconectado por un interruptor centrífugo. Sin embargo en el caso de partida capacitiva, en especial en motores de mayor tamaño, el uso del condensador se mantiene luego de la partida mejorando de esta forma las cualidades de torque y factor de potencia de la máquina, luego en este caso no se requerirá el interruptor centrífugo.

Otro método de partida para motores pequeños es la utilización de una espira ubicada en la cara polar del estator, conocida como 'espira de sombra', la cual al estar sometida al campo magnético del estator se induce en ella una corriente que produce a su vez una desviación del flujo magnético y con ello el torque inicial de partida. Esta espira está fija en la cara polar y no se desconecta, debe ser robusta para soportar las corrientes inducidas.

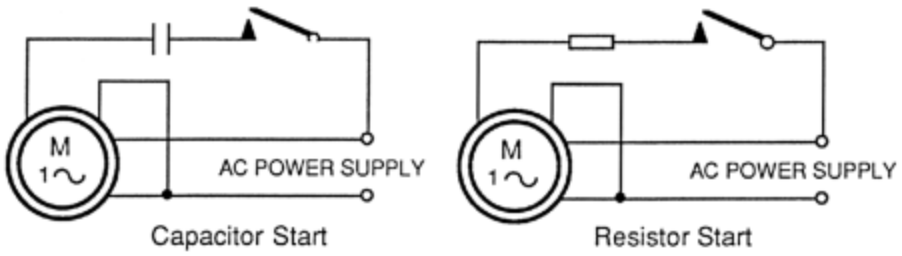


Diagrama de Circuito para Motor de Inducción de 1 Fase

Existen diferentes métodos de partida para estos motores, como son partidas capacitivas o resistivas, en este caso la experiencia se enfocara en la partida espira de sombra.

En el motor de polos sombreados el campo auxiliar es producido por una espira de sombra dispuesta en uno de los extremos del polo de campo.

Las corrientes inducidas en este anillo producen una concentración de flujo en los extremos opuestos a éste, generándose el efecto de rotación del flujo desde la parte libre a la parte sombreada, con lo cual se logra un pequeño torque de partida.

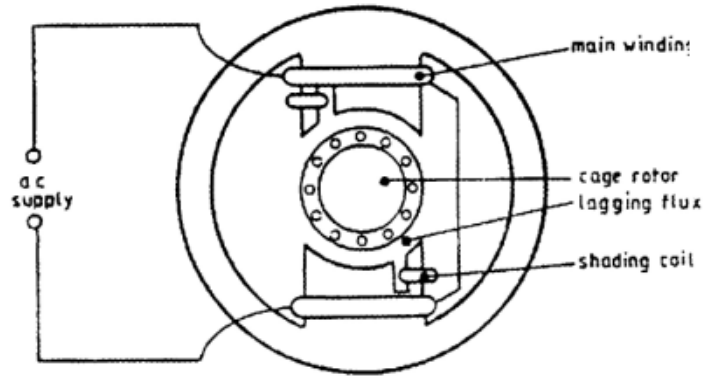
3.1 Trabajo de Laboratorio

3.1.1 Materiales

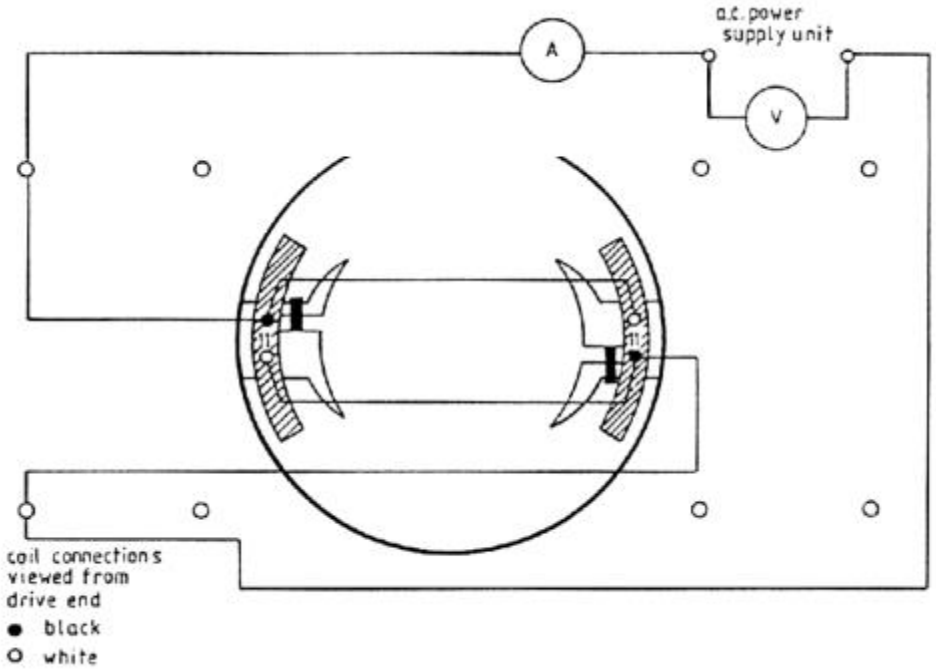
Estator:	Instrumentos:
2 polos de campo con espira de sombra	1 fuente monofásica (60 - 121)
2 bobinas L11	1 amperímetro AC 0 - 5 A (68 - 117)
Rotor:	1 voltímetro AC 0 - 250 V (68 -117)
1 rotor jaula de ardilla	1 tacómetro óptico
	1 torquímetro

3.1.2 Experiencia

Para esta experiencia se necesitaran las siguientes conexiones:



Motor con espira de sombra- Tipo Polo Saliente



Ajuste el voltaje de salida a 70 V y observe el comportamiento del motor a medida que acelera y su velocidad final debiera ser 2.850 rpm. Luego corrija el voltaje si es necesario a 70 V, en esta condiciones la corriente debe ser de 3 A.

Mida el torque de partida con un torquímetro, luego haga mediciones de torque a medida que el motor acelera, y vea su crecimiento.

Nota: al instalar el torquímetro es probable que el motor no parta, por lo que puede girarlo manualmente para este propósito.

V. EXPERIENCIAS SEGUNDA SESIÓN

El objetivo de esta segunda sesión es aplicar pequeñas experiencias con diferentes tipos de maquinas, que se pueden armar en el feedback, a diferencia de la primera sesión, en esta se deberán tener conocimientos más específicos sobre las maquinas con las cuales se ensayaran ya que se harán pruebas puntuales.

1 Motor de paso tipo reluctancia

El objetivo de la presente experiencia, es el estudio del motor de reluctancia Paso a paso, a través de la experiencia de maquina Básica.

El motor de reluctancia paso a paso, aprovecha el torque de reluctancia producido por el eje eléctrico (bobinas), de cada par de polos del estator.

El rotor es de tipo polos salientes y no tiene alimentación. El número de polos del rotor y del estator es diferente, es decir no hay simetría. Con esto se logra un desfase de ángulo de manera que al energizar un par de polos, se genere torque y alineación del eje eléctrico con el eje del circuito magnético.

El alumno podrá a través del uso de la maquina básica, experimentar con este tipo de motor, alineando el rotor con los polos del estator, buscar la posición en que el circuito magnético posea la mínima reluctancia.

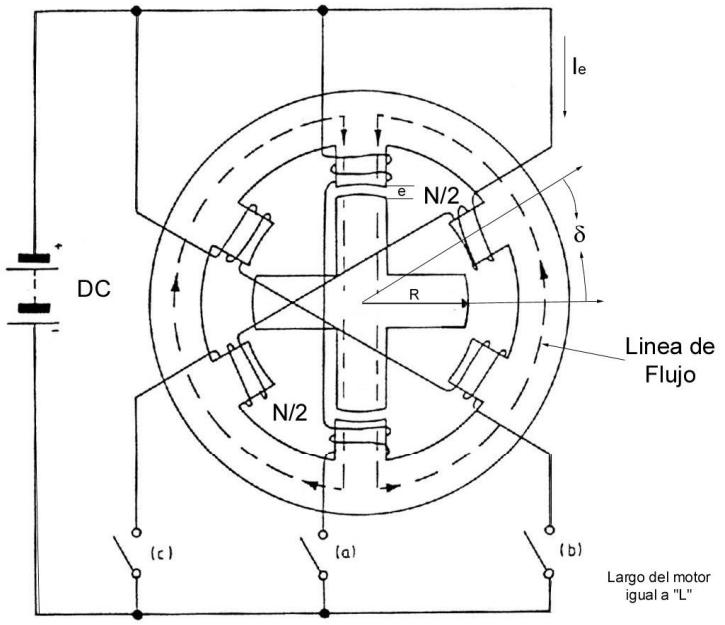
También se podrá profundizar en la construcción de este tipo de motor, de manera de mejorar el torque, incrementar el factor de amortiguamiento etc.

1.1 Marco Teórico

Este motor se hace girar conmutando la corriente en forma electrónica, de modo que solo una de las bobinas de estator, es alimentada con corriente continua en cada instante. Al cambiar la alimentación a otra bobina, el rotor gira a un paso, y así sucesivamente.

Un motor de reluctancia de Paso a Paso, se caracteriza por:

- Tiene el sentido de giro contrario al campo rotatorio producido por las bobinas del estator
- El número de polos de rotor y estator, son distintos.



Este motor, aprovecha el torque de reluctancia producido por el eje eléctrico (bobina) de cada par de polos del estator. De esta forma el torque producido por el motor será:

$$T_e = \frac{1}{2} i_e^2 \frac{dL_e}{d\delta}$$

En donde Ie es la corriente por la bobina energizada en un momento determinado. Por otro lado, Le viene dado por:

$$L_e(\delta) = \frac{\mu_o \cdot L \cdot R \cdot N^2}{2e} \delta$$

Se debe notar que el torque es dependiente del ángulo, así como de la reluctancia que hay en el entre hierro de distancia “e” (ver figura).

$$R(\delta) = \frac{2e}{\mu_o \cdot A(\delta)}$$

El A(δ), es el área sobre la cual se esta considerando el calculo de la reluctancia, y que vendrá dado por el largo del motor (L), así como la fracción del ancho del polo alineado. Por otro lado

$\mu_o = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

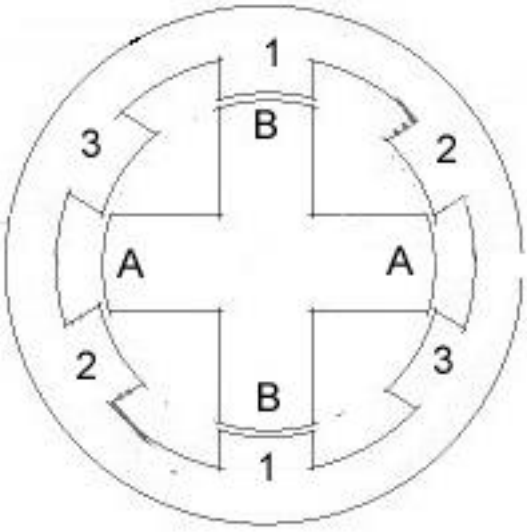
Cabe destacar que el valor de "N", o sea el numero de vueltas de cada espira de los polos esta repartido en dos mitades. Una para la bobina superior y otra para la inferior.

La operación del motor, es descrita como:

- el rotor se alinea con los polos del estator energizado buscando la posición en donde el circuito magnético posea la mínima reluctancia (condición de mínima energía).

Por tal razón, el motor que se muestra en la figura puede ser operado con una o dos pares de polos energizados.

1.1.1 Operación con un par de polos energizado



Como ya se dijo, el sentido de giro del motor será contrario al sentido de giro del campo rotatorio del estator. Vale decir, si se alimenta la bobina numero uno, el eje BB del rotor se alineara con ella. (1BB1) Ahora, si se apaga la bobina 1 y se enciende la bobina 2, el eje AA se alineara con esta (2AA2). Para seguir con el sentido de giro antihorario, se energizaran las bobinas secuencialmente en el sentido horario, tal como se describe en la siguiente tabla

Polos Energizados	Polos Apagados	Posición Rotor
1	2,3	1BB1
2	1,3	2AA2
3	1,2	3BB3
1	2,3	1AA1
2	1,3	2BB2
3	1,2	3AA3

(Tabla con secuencia de Giro)

1.1.2 Operación con dos pares de polos energizado

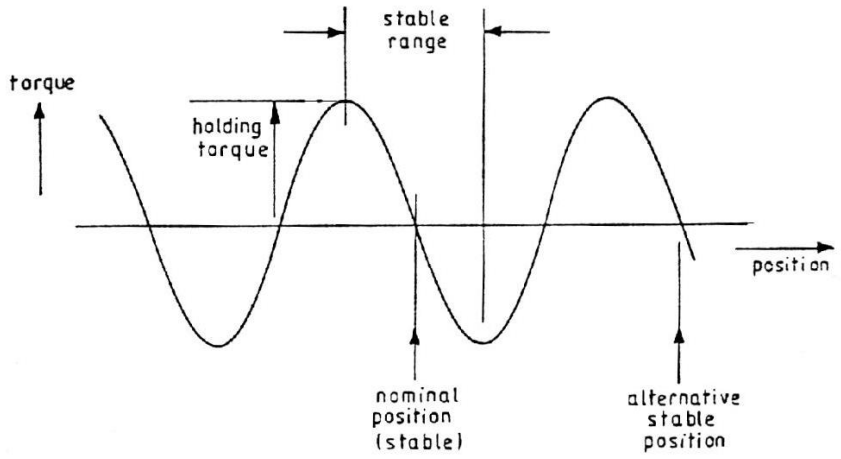
La condición de giro es la misma, variando solo la secuencia de giro (energizado), quedando:

Polos Energizados	Polos Apagados	Posición Rotor
1,2	3	1(bb)/21 2(aa)/22
2,3	1	3(bb)/23 2(aa)/22
3,1	2	3(bb)/23 1(aa)/21
1,2	3	2(bb)/22 1(aa)/21
2,3	1	2(bb)/22 3(aa)/23
3,1	2	1(bb)/21 3(aa)/23

(Tabla con secuencia de Giro)

Un parámetro importante en un motor de pasos, es precisamente el "paso" o ángulo entre un punto de equilibrio y otro. Para el caso particular, que se muestra en la figura (dos polos de rotor y uno de estator), el paso es de 30º. Si el numero de polos aumenta, disminuirá el paso, haciendo mas continuo tanto el torque como la velocidad, sin embargo, aumenta la complejidad en el control de la secuencia. Una condición absolutamente necesaria es que el numero de polos de rotor, sea menor que el de estator. De otra forma no habrá giro.

La velocidad del motor se mide en Pasos / segundo, y es directamente proporcional a la velocidad con que se conmuten las fases. Sin embargo, un motor de Pasos posee el máximo torque en el punto de equilibrio. A este torque se le llama "torque de mantencion" y corresponde al máximo torque mecánico resistivo. Por tal razón, la característica de torque será pulsatil, tal como se aprecia en la figura:



Existe un fenómeno que se debe tener en cuenta al momento de operar de manera "suave" y a velocidad constante el motor, y es el "efecto de Inercia". Por tener inercia el rotor, al conmutar las fases este ira de un punto de equilibrio, a un nuevo punto de equilibrio, produciéndose una Oscilación. La magnitud de la oscilación dependerá de la reluctancia, por lo que se produce un "amortiguamiento magnético". La velocidad de conmutación debe ser escogida de modo de aprovechar este efecto de inercia, minimizando oscilaciones.

Finalmente, se pude concluir que este motor resulta adecuado en aquellas aplicaciones donde se requiere conocer la posición exacta del rotor, por ejemplo en carros de impresoras, orientación de antenas, etc.

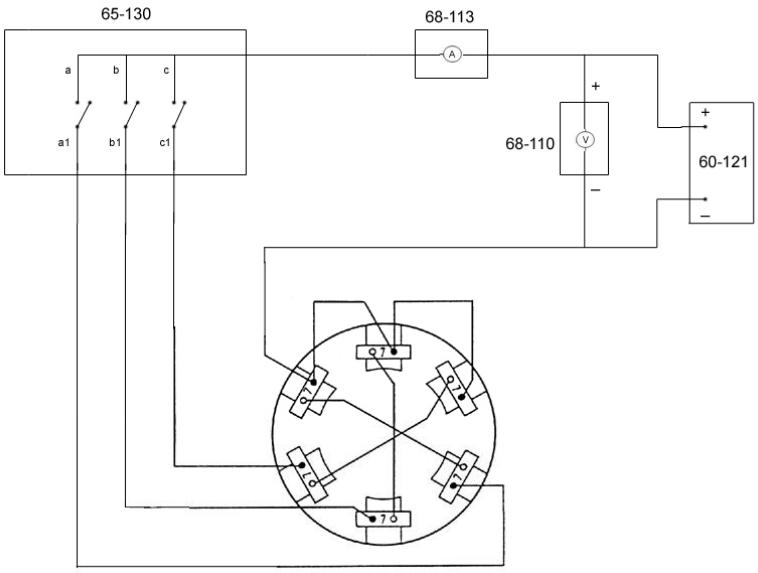
1.2 Trabajo de Laboratorio

1.2.1 Materiales

Estator: 6 bobinas L7 6 interpolos Rotor: 1 rotor de 4 polos rectos	Instrumentos: 1 fuente de poder DC (60 - 121) 1 amperímetro DC 0 - 5 A (68 - 110) 1 voltímetro DC 0 - 50 V (68 - 110) 1 caja de interruptores (65 - 130) 1 puntero

1.2.2 Experiencia

Para el desarrollo de esta experiencia se utilizara la siguiente configuración, interconectando distintos paneles, tal como lo muestra la siguiente figura



1.2.3 Experiencia 1: Operación con una fase energizada

- Encienda el interruptor 'a' encienda la fuente y aumente el voltaje lentamente hasta obtener una corriente de 1.5 A, el voltaje debe ser aproximadamente 10 V.

- Encienda secuencialmente los interruptores y mida el ángulo de paso por medio del puntero.

1.2.4 Experiencia 2: Operación con 2 fases energizadas

- Sin apagar la fase 'a' energice la fase 'b'.

- Establezca una secuencia adecuada para los interruptores de manera de tener siempre 2 fases energizadas y lograr movimiento.

1.2.5 Experiencia 3: Oscilaciones

- Con la fase 'a' energizada apáguela y observe el rotor mientras se enciende la fase 'c', se produce una oscilación considerable.

- Con el interruptor 'a' y 'b' conectados observe la oscilación al encender el interruptor 'c' apagar el interruptor 'a' simultáneamente. Observe la velocidad de rotación y la oscilación.

- Intente manejar el motor de forma tal de minimizar las oscilaciones para una y dos fases.

2 Cambio de Número de Pares de Polos

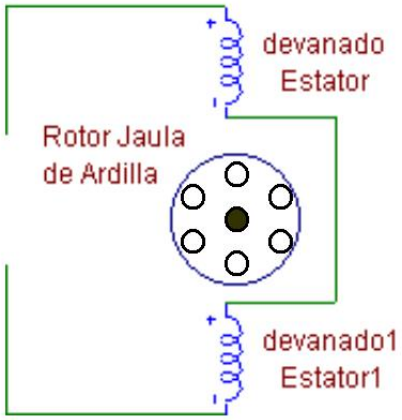
En muchas aplicaciones es necesario hacer cambios de velocidad. En un motor de inducción, esto puede lograrse entre otras, cambiando el número de ejes eléctricos del estator, es decir, cambiando el número de pares de polos del estator por fase.

Se puede realizar el cambio, teniendo dispuestos dos estatores, con un interruptor de manera de efectuar la operación de manera sencilla.

2.1 Marco Teórico

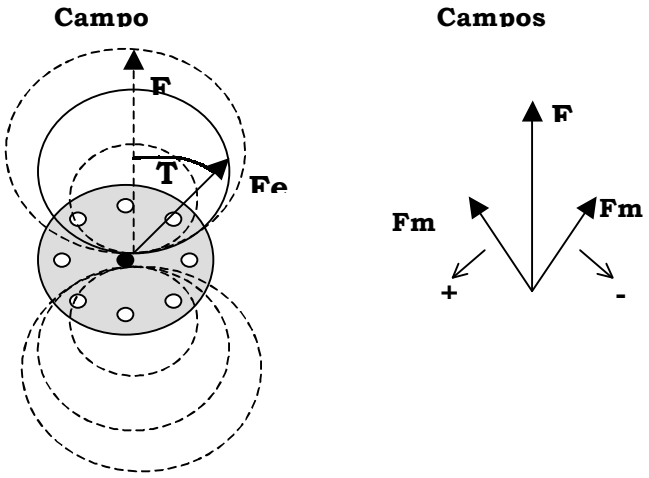
2.1.1 Funcionamiento de la Máquina:

Estructuralmente los tipos más comunes de motores monofásicos de inducción se asemejan a los motores polifásicos de jaula de ardilla, excepto por el arreglo de los devanados del estator. En la figura 1 se observa un esquema de un motor monofásico de inducción con rotor en jaula de ardilla. La característica más relevante de este tipo de motor es que no cuenta con un par de arranque, su torque de partida es cero.



Al alimentar el motor de la figura con una corriente alterna sinusoidal se crea en el estator un campo magnético pulsante a la frecuencia síncrona w_s, (frecuencia de la red dividida en el N° de pares de polos) el que se puede descomponer en 2 campos rotatorios idénticos que giran en sentido inverso a ω_s.

En la siguiente figura se observa un diagrama que muestra el flujo pulsante y los flujos rotatorios.



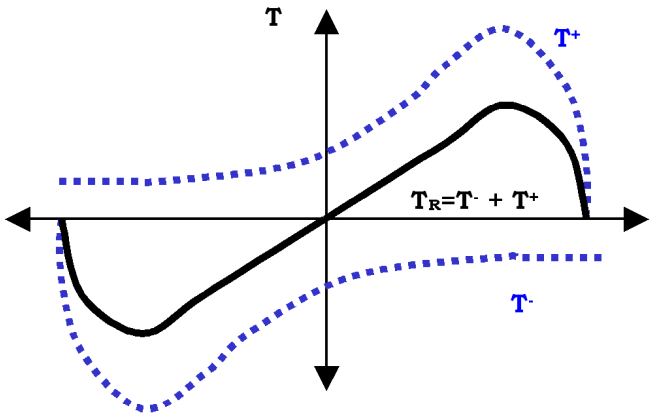
(Fm : máximo flujo ; Fe flujo instantáneo)

Esta disposición de los campos da origen a un torque equivalente pulsante que puede descomponerse en dos torques rotatorios a velocidad angular ω_s. Estos dos torque T^+ y T^- actúan de forma independiente superponiéndose:

$$T^+ = \frac{1}{2} Fm^+ \cos(\varphi - wt)\,\mathrm{sen}(\delta \ni r^+)$$

$$T^- = \frac{1}{2} Fm^- \cos(\varphi + wt)\,\mathrm{sen}(\delta \ni r^-)$$

La característica de torque final será generada por la acción combinada de ambos campos rotatorios, de donde obtenemos la siguiente curva T-ω (fig 3.)



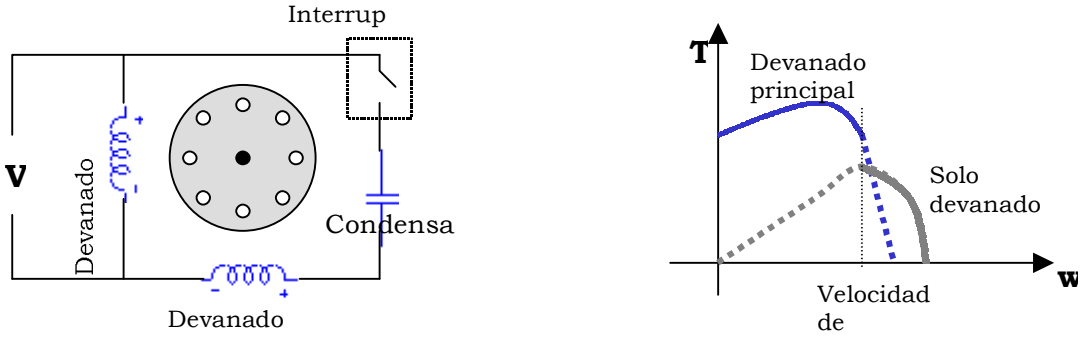
En la figura de la característica de torque se puede observar:
1. Torque nulo para velocidad angular cero.
2. El sentido de giro será definido por el impulso inicial.
3. La velocidad en vacío es menor que la síncrona

2.1.2 Métodos de Partida.

Dado el nulo torque en la partida es necesario idear métodos de modo de poder generar un torque inicial. Para ello es necesario crear un campo magnético rotatorio neto en el arranque. Los mecanismos de partida transformarán el motor monofásico en uno bifásico. Se analizará el método *fase partida capacitivo* el cual se ocupará en la experiencia.

Los métodos fase partida requieren de un segundo enrollado en el estator, generalmente en cuadratura y en paralelo con el principal, por el cual circula una corriente desfasada. De esta forma se crea un campo magnético rotatorio. La mejor combinación entre corriente de partida, torque de partida y costo se alcanza cuando el desfase entre las corrientes por ambos enrollados es un poco menor que 90°. Esto se logra añadiendo al circuito del devanado auxiliar un condensador en serie el cual adelanta la corriente auxiliar en 90°. Luego de la partida, cuando el motor ha alcanzado una velocidad cercana a la de régimen se puede desconectar o no la rama auxiliar dependiendo de que característica de torque se requiera.

Se observa el diagrama del método descrito con desconexión centrifuga junto a la característica de torque resultante.

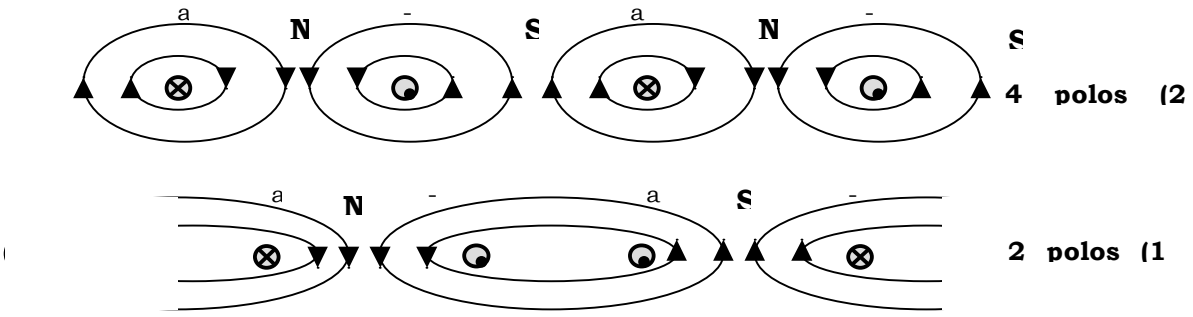


2.1.3 Control de Velocidad. Cambio en el número de Polos

Una de las características de la máquina de inducción monofásica (y trifásica) es la dificultad para controlar su velocidad. El método más simple de control de velocidad se realiza variando el voltaje de alimentación. Este control permite variar la velocidad en forma continua dentro de un pequeño rango en torno a la velocidad nominal. Sin duda el mejor método de control de velocidad es la variación de la frecuencia de alimentación. Éste permite obtener el torque nominal para cualquier

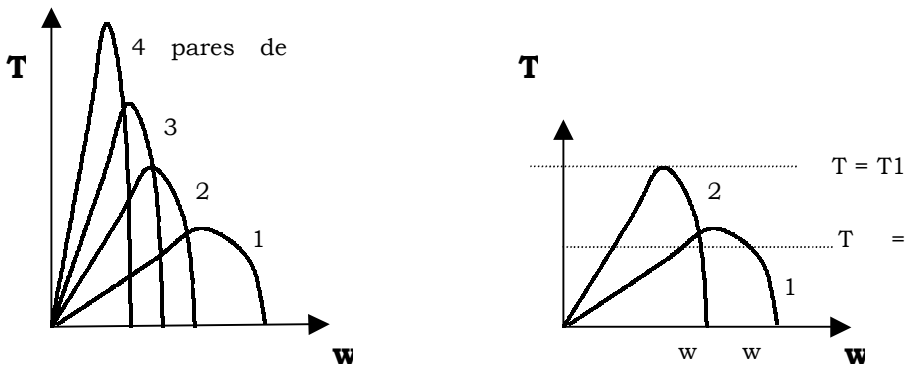
velocidad angular w. Sin embargo la complejidad del sistema es mayor. Un tercer método de control es el de la variación del número de polos del estator. Este método permite un control discreto de la velocidad obteniéndose una velocidad distinta para cada número distinto de pares de polos. El método se utiliza solamente con rotores de jaula de ardilla pues en estos el número de polos inducidos en el rotor es igual al número de polos del estator. Si se quisiera implementar con un rotor bobinado se tendría que realizar el cambio de polos tanto en el rotor como en el estator.

En general se diseña el devanado del estator de modo que con cambios sencillos en las conexiones de las bobinas se puedan cambiar los polos en relación 2 a 1 con lo que se puede seleccionar una de dos velocidades síncronas. En la figura 5 se observan los principios básicos de devanado para el cambio de número de polos. aa y a'a' son dos bobinas del estator (un devanado real se constituiría de varias bobinas).



Al mover el switch de control se invierte el sentido de la corriente que circula por la bobina a'a' y la configuración de 4 polos del estator se transforma en una de 2 polos. Al ser el rotor de jaula de ardilla, en éste se inducen primero 4 y luego 2 polos de acuerdo con los que existan en el estator.

A continuación se observa un gráfico donde se aprecia la característica de torque velocidad para diferente número de pares de polos:



En el gráfico de la izquierda se observan las características de torque para distinto número de pares de polos en el rotor. Se observa que a medida que aumenta el número de polos la velocidad para un mismo torque disminuye, pero el torque máximo posible aumenta. Si por ejemplo se tiene un torque resistivo T0 (gráfico derecha) y se tiene la configuración de 4 polos (2 pares), la máquina trabaja a velocidad w2. Si se realiza el cambio a 2 polos (1 par) el motor se acelera y trabaja a velocidad w1. Ahora si el torque resistivo es T1 y se pasa de una configuración de 4 polos a una de 2 polos, T1 es mayor que el máximo torque posible para esta última configuración y la máquina se frena.

El control de velocidad mediante el cambio de número de polos puede ser útil si se requiere de dos velocidades de funcionamiento, las que se pueden obtener simplemente moviendo un switch. Sin embargo si se requiere de un mayor número de velocidades de operación el sistema de conexiones se vuelve crecientemente complejo y resulta un motor más pesado para la potencia entregada.

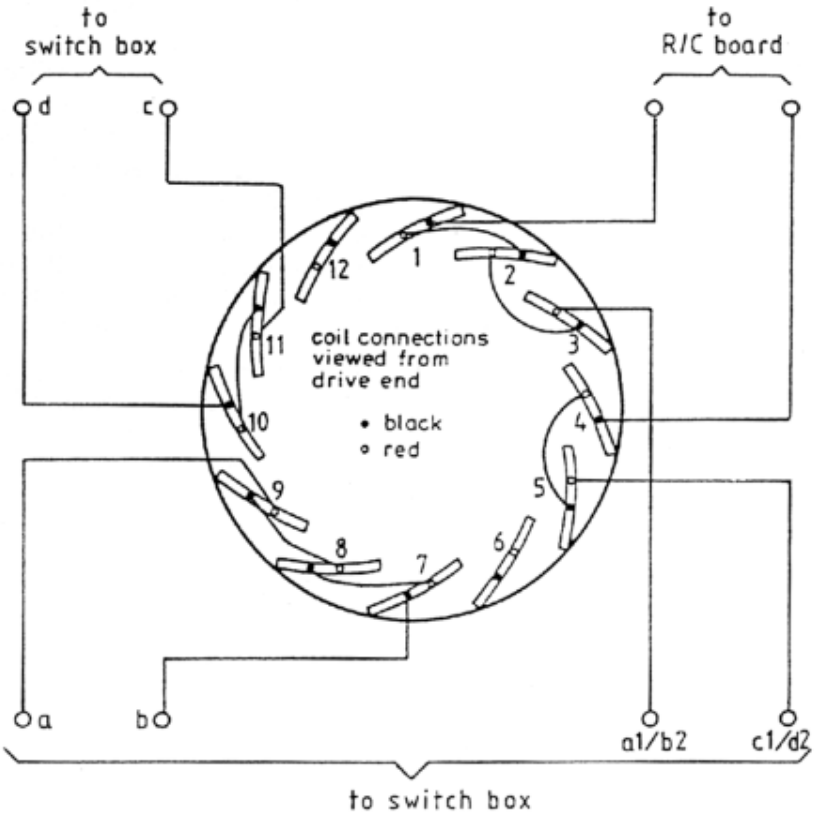
2.2 Trabajo de Laboratorio

2.2.1 Materiales

Estator: 1 Estator distribuido de 12-ranuras Rotor: 1 Rotor Jaula de Ardilla	**Instrumentos:** 1 Fuente trifásica 135 V(60-125) 1 Medidor trifásico (68-100) 1 Caja de Resistencias/ Condensadores (67-190) 1 Caja de Interruptores (65-130) 1 Freno/Torquímetro (PB 184)

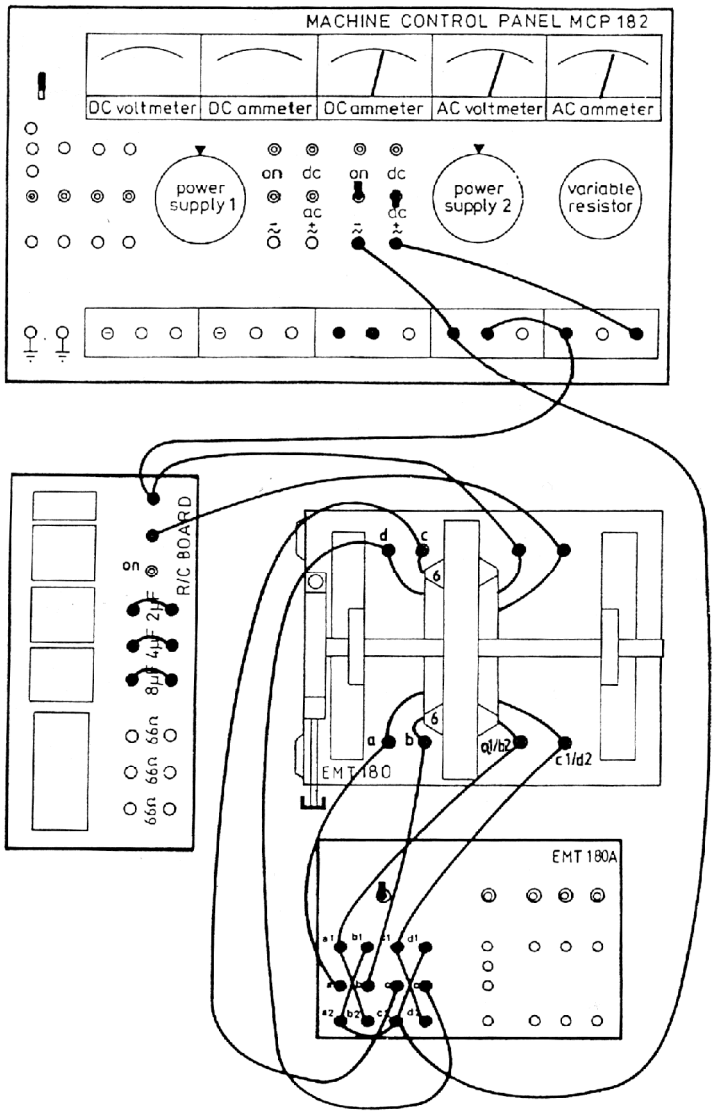
2.2.2 Experiencia

Realizar la siguiente configuración con el estator



Conexiones- Motor de Inducción Cambio de Polos

Luego conectar el siguiente circuito



Laboratory Interconnections – Pole-changing Induction Motor.

El cambio de pares de polos, se realizará entre configuraciones de 2 y 4 pares de polos por fase.

1-. Encienda la alimentación, con el interruptor en 4 –polos y luego cambie a dos. Observe la velocidad.

2-. Frenado: Con el motor funcionando con 2- polos (interruptor posición 2), cambie a la posición 1, repita un par de veces. Compare, que sucede si es que, con el motor funcionando en 2, se suspende la alimentación, dejando el selector de voltaje en 0.

3-. Curva Torque - Velocidad: Realice mediciones de torque y velocidad, entre valores de 0.1Nm y 0.3Nm. Para ambas configuraciones de pares de polos.

3 Generador Brushless

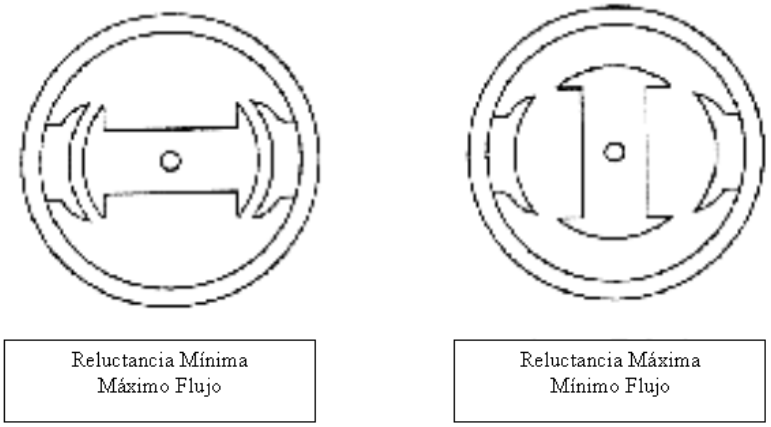
El generador brushless puede visualizarse como un "alternador reluctivo" que puede ser usado para producir corriente alterna de alta frecuencia. Este puede implementarse en ambientes de trabajo en donde un rotor sólido sin contactos o embobinados es conveniente.
El principio de generación está basado en el cambio de reluctancia del circuito magnético a medida que los polos del rotor giran. El campo de excitación en el estator es producido por corriente CC y es cortado por el rotor (el rotor no tiene bobinas, sólo es un circuito de reluctancia).

Notar que la dirección del campo aplicado nunca se revierte, y la variación en el tiempo del flujo magnético sólo es alrededor del valor promedio.

La aplicación más importante de este generador es la posibilidad de generar en alta frecuencia, por ejemplo en aviación se utilizan para generación de 400 o 1.000 Hz, donde la ausencia de escobillas o contactos móviles, reduce interferencias con equipos de radio y otros equipos electrónicos, además que se logra reducir el tamaño de transformadores y fuentes ganándose una reducción de peso y volumen.

3.1 Marco teórico

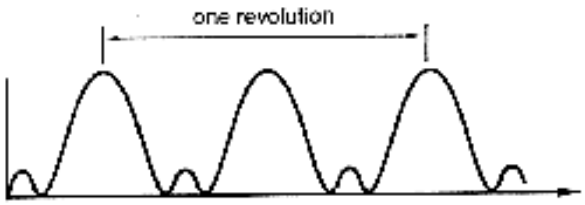
El campo provocado por la corriente continua de excitación es variado sobre su valor, por el cambio en reluctancia del circuito magnético en el alterador del inductor como los polos del rotor son rotados. En la siguiente figura se muestra las posiciones de máximo y campo del mínimo.



Además la dirección del campo alrededor de los polos del estator varía cuando los polos del rotor están acercándose y están abandonando los polos del estator y causa variaciones extensas en la cantidad de flujo de los bobinados. Los efectos combinados de estos cambios en uniones de

flujo causan una generación de fem en los bobinados de excitación. Es importante señalar que el campo nunca avanza realmente para atrás pero meramente varía sobre un valor. Esta variación es sólo un fragmento pequeño del campo estático y tan sólo produce un bajo rendimiento por lo que la máquina es de eficacia baja.

Puesto que las mismas condiciones magnéticas ocurren dos veces por revolución, la frecuencia fundamental generada es dos veces la velocidad del eje. La forma compleja de la variación de flujo, sin embargo, significa que la fem no es realmente sinusoidal.



La forma de este forma de onda es casi constante sobre una gama amplia de velocidades del rotor. La constancia de forma será determinada solamente por los cambios en geometría del campo sobre la mitad de una revolución.

3.2 Trabajo en Laboratorio

3.2.1 Materiales

Estator:	Instrumentos:
2 polos de estator 2 bobinas L4 2 bobinas L5 Rotor: 1 rotor de 2 polos cilíndricos	1 motor de velocidad variable (VSD 177) 1 fuente 0 - 20 V, 5 A DC (60-121) 1 voltímetro 0 - 50 V DC (68 - 110) 1 amperímetro de cero central ± 1 A DC (68-113) 1 voltímetro 0 - 10 V AC (68 - 117) 1 condensador electrolítico de 10 (mF) 25 V (67 - 190) 1 resistencia variable 0 - 100, 3 A. (67 - 113) 1 Osciloscopio

3.2.2 Experiencia

Par esta experiencia se deberá realizar la siguiente configuración

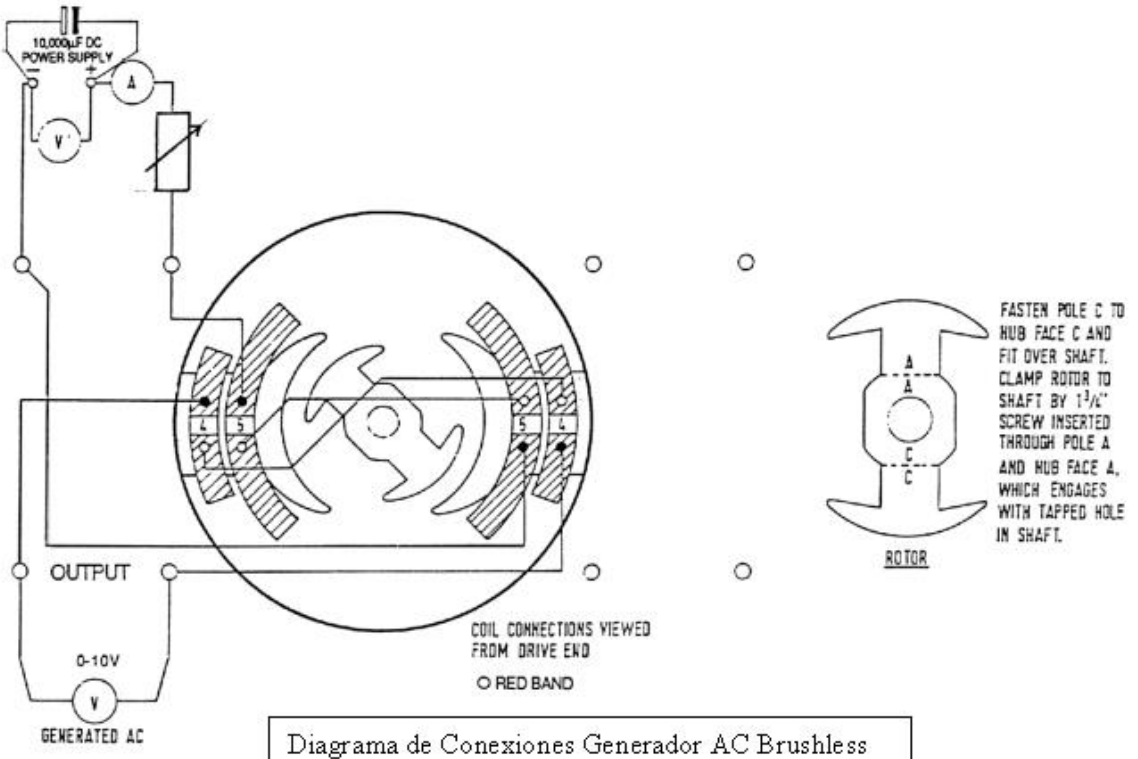


Diagrama de Conexiones Generador AC Brushless

Observación: el condensador electrolítico en paralelo con la fuente de poder DC es necesario para filtrar la señal de alimentación de forma que esta sea plana. En el caso de usar DC proveniente de baterías, el condensador se puede omitir ya que no es propio del circuito de generador AC brushless

3.2.3 Test de velocidad y excitación

1.-Encienda la fuente DC, ajuste la resistencia variable en 0V. Ajuste el voltaje para una corriente de excitación de 0.5 A.

2.-Encienda el motor (VSD 177) y aumente su velocidad en pasos de 200 rpm., tomando los valores de salida del generador.

3-.Detenga el motor y varíe la resistencia serie para 4 valores, considerando que las bobinas de campo.
tienen una resistencia de 5 Ohm. Para R=5; 20; 40 y 80 Ohm grafique la generación versus velocidad. Durante las mediciones visualice mediante el osciloscopio la forma de tensión generada. Cada vez que se varíe la resistencia debe ajustarse lentamente la corriente de excitación al valor de 0.5 A aumentando la tensión de la fuente DC variable.

CUIDADO DE NO SOBREPASAR LA CORRIENTE DE EXCITACIÓN SOBRE LOS 0.5 A

4 Motor de Repulsión

El motor de repulsión es una forma de motor de inducción, con una característica torque- velocidad distinta. Sus características constructivas son similares a las de un motor serie de corriente continua, teniendo principios de funcionamiento distintos.

El motor de repulsión, tiene estator con un campo pulsante monofásico y su rotor consiste en bobinas cortocircuitadas en donde se **induce** su fuerza magnetomotriz.

Para mantener la condición de torque medio, se utiliza el colector, que conmuta las bobinas a cortocircuitar, a través de las escobillas.

Debido a que el ángulo de ataque de las escobillas, determina el ángulo de torque de la máquina, es muy importante la posibilidad de variarlo, variando con éste, la velocidad y dirección de giro.

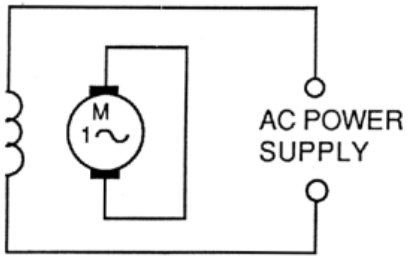
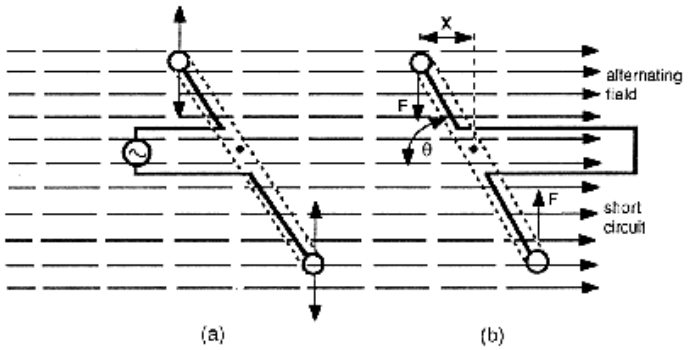


Diagrama de Conexión – Motor de Repulsión Simple de una fase

El motor de repulsión es una forma de motor de inducción pero tiene características de torque-velocidad diferentes que combinado con la habilidad de controlar velocidad y dirección meramente rotando los cepillos, lo hace útil en ciertas aplicaciones.

¿Por qué se usa el nombre de repulsión? Considere la próxima figura la que muestra (a) un enrollado simple, energizado a por una fuente de a.c externa y a (b) otro, cortocircuitado. Se ponen ambos enrollados en un campo magnético uniforme pero alternando.

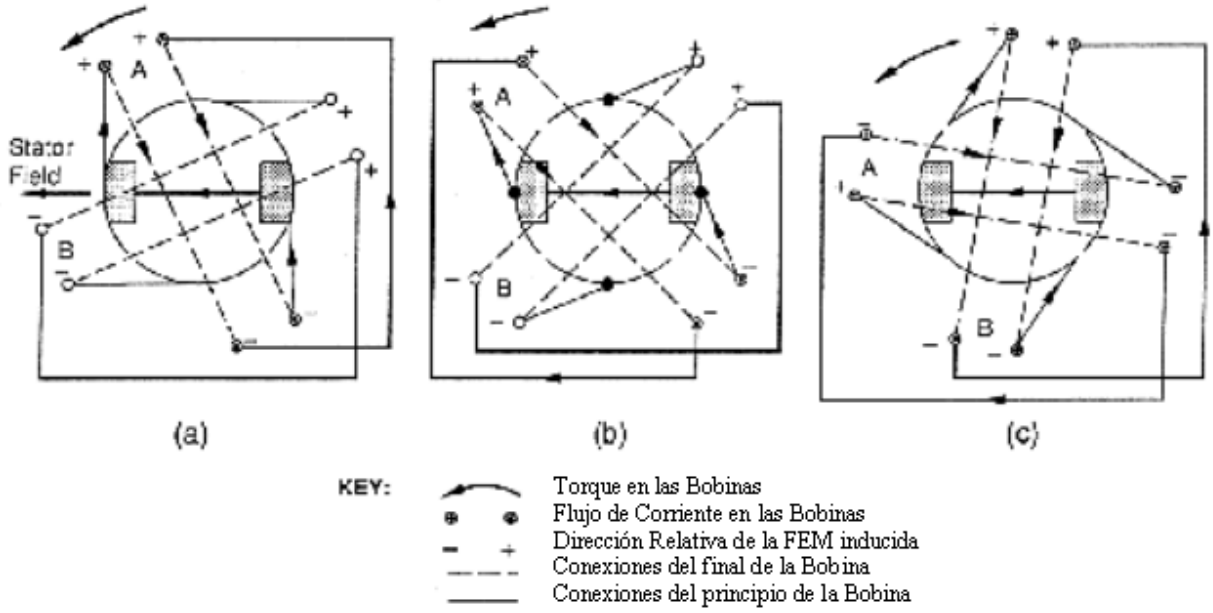


En figura anterior (a) la corriente producida por el suministro de externo causa una fuerza que es aplicada a los lados de los enrollados en las direcciones mostrada y depende de las fases relativas del campo y alternaciones de suministro de enrollado. Como sea que esto pasa, los enrollados rotatorios inducen una fem en el enrollado de campo del alternador, lo que opone de la fuente externa al máximo el posible grado (conservación de energía).esto ocurre cuando el enrollado queda en ángulos rectos al campo y su eje magnético se alinea con el campo.

En figura parte {b) los fem inducido en el enrollado dan lugar a una corriente que causa una fuerza el enrollado, (de nuevo por conservación de energía) el enrollado mueve para minimizar el fem inducido y la corriente del resultante. Así los extremos del enrollado se alinea con el campo y los ejes magnéticos en ángulos rectos. Puede decirse entonces que los dos polos magnéticos se han rechazado entre si. En este sentido todos los motores de inducción son motores de repulsión pero el nombre sólo se usa para los tipos del conmutador.

Incidentemente la variación del torque en un solo enrollado de los motores puede verse en la anterior figura parte (b). Los fem generados y la corriente y F. depende del flujo total abarcado por el enrollado y esto varía como senθ y es máximo cuando el enrollado está en los 90° al campo. El torque es FX y X varia como cosθ. Así el torque varía como sinθ cosθ o como sin2θ. Así el torque es máximo aproximadamente en 45° y en cero a los 0° y 90°. En la practica el campo no es uniforme como ha sido supuesto y el torque tiende a ser máximo a aproximadamente en 65º y entonces se reduce rápidamente a 90°.

La siguiente figura ilustra los fems, corrientes y torque del resultantes en el rotor para las posiciones diferentes del motor.



En (a) el enrollado B no tienen ningún circuito y ningún flujo actual a pesar del fem inducido. Pero los enrollados A llevan corriente como es indicado por las flechas y un torque de antihorario cerca del máximo se desarrolla en ellos.

En (b) las mismas condiciones ocurren pero el fem inducido en los enrollados A es menos. Un torque del antihorario todavía existente pero es más pequeño.

En (c) los cepillos han ponteado simplemente los segmentos del conmutador. El enrollado A tiene un fem pequeño ahora y enrollado B uno más grande. Hay actualmente flujos en ambos enrollados pero más en B que en A. A produce torque en el sentido de las agujas del reloj, pero no uno grande como los enrollados que están cercanos los 90°.

B produce un torque del antihorario pequeño y el torque del resultante es casi cero y permanece para que el enrollado B alcance la posición A, como se ve en la figura anterior cuando el recomienza el ciclo. Hay un torque de antihorario que produce rotación continua.

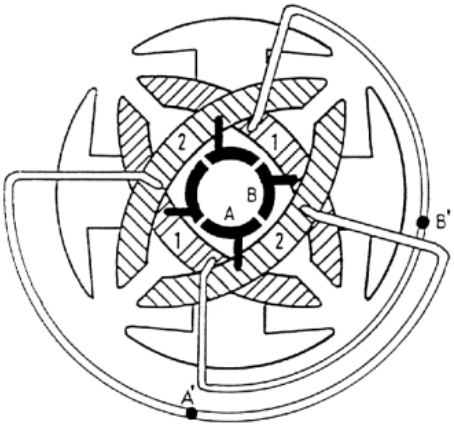
4.1 Trabajo en Laboratorio

4.1.1 Materiales

Estator:	Instrumentos:
2 Polos de campo	1 Fuente 0-135V AC Monofásica (60-121 9
2 Bobinas L9	1 0-200V AC Voltímetro (68-117)
1 Colector/Anillos	1 0-5A AC Amperímetro (68-117)
1 Portaescobillas rotable (RB185)	1 0-5A DC Amperímetro cero central (68-113)
Rotor:	1 Tacómetro
1 Rotor cilíndrico 4 polos	1 Torquímetro
2 Bobinas L1	
2 Bobinas L2	
1 Manivela	

4.1.2 Experiencia

Para esta experiencia se deberá utilizar la siguiente configuración tanto para el estator como para el rotor



Conexiones de Armadura para Motor de Repulsión con ángulo fijo de escobillas

Los puntos de conexión A' y B' son puntos de unión. Para fijarlos sobre el portaescobillas debe usarse los pilares de aislación para evitar el contacto con la delga del portaescobillas.

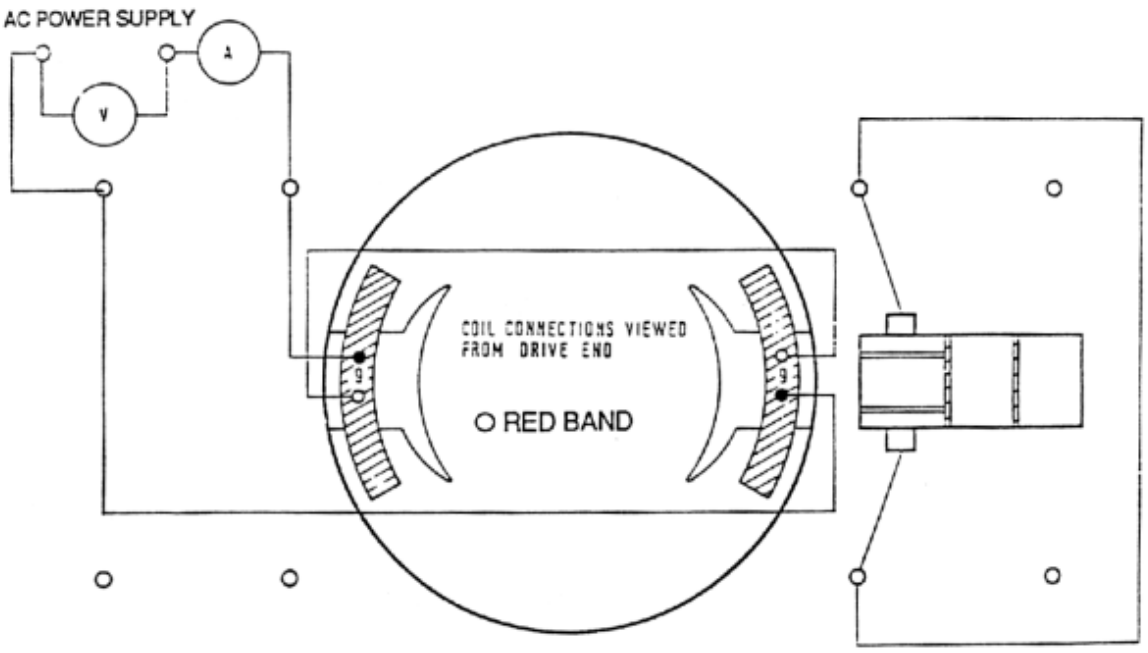


Diagrama para Motor de Repulsión AC de una Fase

Con las escobillas en 0º (posición normal), acople la manivela y encienda la alimentación. Gire el eje manualmente y pruebe el torque de la máquina, en ambos sentidos de giro, notar como el torque varía. Puede comprobarse que el torque generado cerca de los 45º es bajo. Este punto es la posición de equilibrio y el torque será positivo o negativo según la dirección del movimiento del eje. En otras palabras, en ese punto el torque neto es nulo y el motor no partirá.

Desconecte y repita lo anterior para 90º, comente.

Desconecte y retire la manivela. Repita lo anterior con un ángulo de 80º, si el motor no gira dé un pequeño impulso de partida. Al estar rotando, ajuste el ángulo hasta la máxima velocidad, esto debería ocurrir cerca de los 70º.

Ahora gire las escobillas a 90º y luego hasta 110º.

Describa que es lo que sucede con las fuerzas magnetomotrices, al cambiar el ángulo de las escobillas, en particular con el torque sobre las espiras cortocircuitadas. Dibuje un esquema en donde se describa las variaciones de torque y de corriente, para una espira cortocircuitada.

Dibuje una curva de Torque de partida versus ángulo de escobilla.

VI. EXPERIENCIAS RECOMENDADAS POR EL FABRICANTE

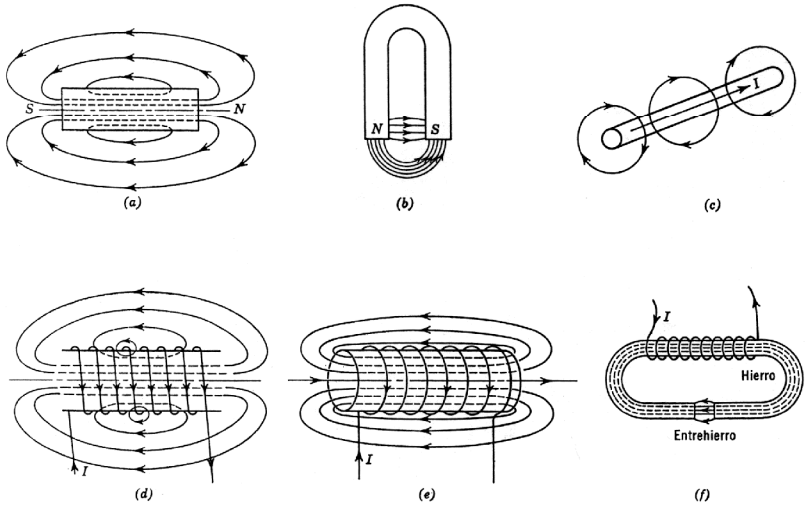
1 Flujo y circuito magnético de inducción "Modelo de distribución de energía eléctrica"

Esta experiencia busca poder comprobar y 'visualizar' los efectos de inducción magnética. Estos efectos son los mismos a los utilizados en los procesos de generación en centrales y en la distribución de la energía.

Se parte de 2 principios electromagnéticos:

Todo conductor por el cual circula una corriente eléctrica, genera un campo magnético a su alrededor. Si se trata de un conductor recto, el campo magnético que se formará será de la forma de anillos circulares cuyo eje será el conductor, y su sentido se definirá según la 'regla de la mano derecha'.

Cuando existe un movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético, se desarrolla una diferencia de potencial eléctrico entre los extremos del conductor.



Configuraciones de campos magnéticos para geometrías simples. (*a*) Imán de barra. (*b*) Imán de herradura. (*c*) Alambre recto con corriente *I*. (*d*) Solenoide con núcleo de aire. (*e*) Solenoide con núcleo de hierro. (*f*) Bobina en un circuito magnético compuesto.

El desarrollo de esta experiencia tendrá la particularidad que no se energizará el circuito. El circuito a implementar, reproducirá el principio que se aplica en los sistemas eléctricos de potencia considerando la generación, distribución y el consumo.

1.1 Trabajo en Laboratorio

1.1.1 Materiales

1 bobina L5. 1 bobina L4. 1 estator de doce polos 1 estator de polos salientes 1 imán permanente.	1 miliamperímetro de cero central (Feedback 68-113). 1 rotor de polos rectos. 1 rotor jaula de ardilla. chicotes de conexión.

1.1.2 Experiencia

Inducción en una bobina

Conectar la bobina L5 al miliamperímetro de cero central, utilizar la escala menor [± 1mA].

Con el imán efectuar movimientos alternativos de acercamiento y alejamiento al centro de la bobina. Se apreciará en el instrumento el efecto de inducción al deflectar la aguja en uno u otro sentido según el imán se esté acercando o alejando de la bobina.

Puede comprobarse que dejar fijo el imán cerca de la bobina no produce ningún efecto, y la aguja permanece inmóvil, es el movimiento del campo magnético el que produce la inducción (recordar el principio II), en términos matemáticos es la variación del flujo es decir la derivada del flujo la que produce la inducción en la bobina.

Observar también como influye la velocidad del movimiento del imán, lo que se refleja en una mayor o menor deflexión de la aguja. Por lo tanto para lograr la inducción se necesita una variación de flujo magnético, y además la tensión generada irá en relación al valor de esa derivada. Es decir para movimientos rápidos del imán se obtendrán deflexiones de la aguja mayores lo que representa tensiones más altas que para movimientos lentos, y si el imán está detenido no existirá generación ya que no existe variación en el flujo aunque exista campo magnético.

Este principio es aplicado en los generadores de centrales eléctricas. En general se trata de máquinas síncronas las cuales están compuestas por un rotor magnético de CC o imanes permanentes que genera un campo magnético constante, el que gira en el interior de un estator sobre el cual están ubicados los 3 grupos de bobinas con un desfase eléctrico de 120° , lo que produce la generación trifásica.

Inducción en dos bobinas en serie

Si se conectan en serie las bobinas L4 y L5 dejando una sobre la otra , al repetir la experiencia anterior se apreciará una mayor deflexión de la

aguja, esto se debe a que al conectar en serie las dos bobinas (salida no marcada de una bobina a la entrada marcada de la otra), se ha aumentado la cantidad de espiras o vueltas y por lo tanto ante una misma variación del flujo, las mismas líneas de fuerza son capaces de inducir una tensión mayor.

Inducción en 12 bobinas en serie dispuestas en un núcleo magnético

Siguiendo con la idea de aumentar o mejorar la condición de generación, se conectarán en serie las 12 bobinas del estator bobinado, las cuales además están enlazadas magnéticamente a través del núcleo laminado de Fierro - Silicoso, el que facilitará la conducción de las líneas de fuerza. El estator bobinado se ubicará fuera del estator fijo.
Conectar los terminales del circuito al amperímetro de cero central y repetir la experiencia anterior.

Se apreciará que el sistema ha quedado significativamente más sensible a los mismos estímulos realizados con el imán.

Hasta esta parte del circuito, se tiene representada la etapa de generación de una central, corresponde la etapa siguiente en la cual la tensión generada es elevada en los patios de alta tensión para poder transmitirla con menores pérdidas.

Transformación de la energía

Instalar en el interior del estator fijo 2 polos salientes opuestos. Sobre uno de ellos instalar las bobinas L4 y L5, las que actuarán como primario y secundario respectivamente.
Los terminales del primario conectarlos a los terminales de las 12 bobinas conectadas en serie del estator móvil de la etapa anterior. Los terminales del secundario, conectarlos al miliamperímetro de cero central en la escala [±1mA].

Efectuar el mismo proceso de excitación con el imán realizado antes.

Se apreciará que existe un nivel bajo de generación, esto se debe al gran entrehierro que existe en el circuito magnético. Para disminuir las pérdidas por este concepto, se busca mejorar el enlace magnético disminuyendo su reluctancia. Para tal efecto se inserta el rotor de polos rectos (sin eje) con el fin de cerrar el circuito magnético. Nuevamente efectuar el proceso de excitación del sistema y apreciar como aumenta la deflexión de la aguja. Finalmente sustituir el rotor de polos rectos por el rotor jaula de ardilla (sin el eje), el que abarca una mayor superficie de las caras polares y por lo tanto reduce aún más la reluctancia. El resultado que se obtiene es mejorar el nivel de inducción.

Ahora se tiene modelado un sistema eléctrico. La etapa de generación está representada por el imán que se mueve en el interior las 12 bobinas, siendo el imán el correspondiente al rotor con campo CC del

generador síncrono y el estator con las 12 bobinas en serie (generación monofásica) el estator del generador síncrono.

La etapa de transformación se representa por las 2 bobinas superpuestas en una de las caras polares y enlazadas magnéticamente.

Finalmente el consumo está representado por el miliamperímetro de cero central.

En la etapa de transformación puede observarse que entre las bobinas sólo existe un enlace magnético. En la carga representada por el miliamperímetro puede apreciarse también que la frecuencia de generación dada por la velocidad en el movimiento alternativo del imán (acercarlo y alejarlo) aparecerá reflejado en la frecuencia de oscilación de la aguja.

2 Motor de Inducción trifásico

Debido a la extensa aplicación de este motor en la industria, por sus características constructivas y de operación, se hace necesario conocer a cabalidad sus componentes.

Este tipo de motor dada su alimentación trifásica posee un campo magnético rotatorio lo que le permite al motor arrancar sin necesidad de dispositivos adicionales, como es el caso del motor monofásico. El sentido de giro del motor de inducción trifásico estará dado por la secuencia de las fases de alimentación, para invertir dicho sentido de giro, bastará intercambiar el orden de 2 fases cualquiera de ellas.

2.1 Trabajo en Laboratorio

2.1.1 Materiales

Estator: 1 estator distribuido de 12 ranuras Rotor: 1 rotor jaula de ardilla	Instrumentos: 1 fuente trifásica 210 V; 5 A(60 -125) 1 medidor trifásico (68 - 100) 1 tacómetro 1 compás magnético 1 torquímetro

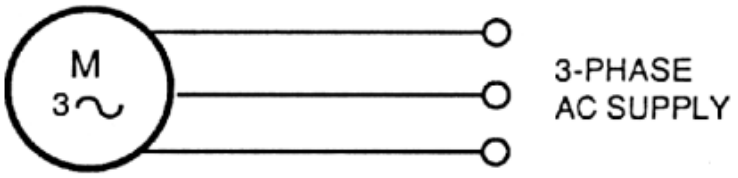


Diagrama para un Motor de Inducción Jaula de Ardilla AC Trifásico

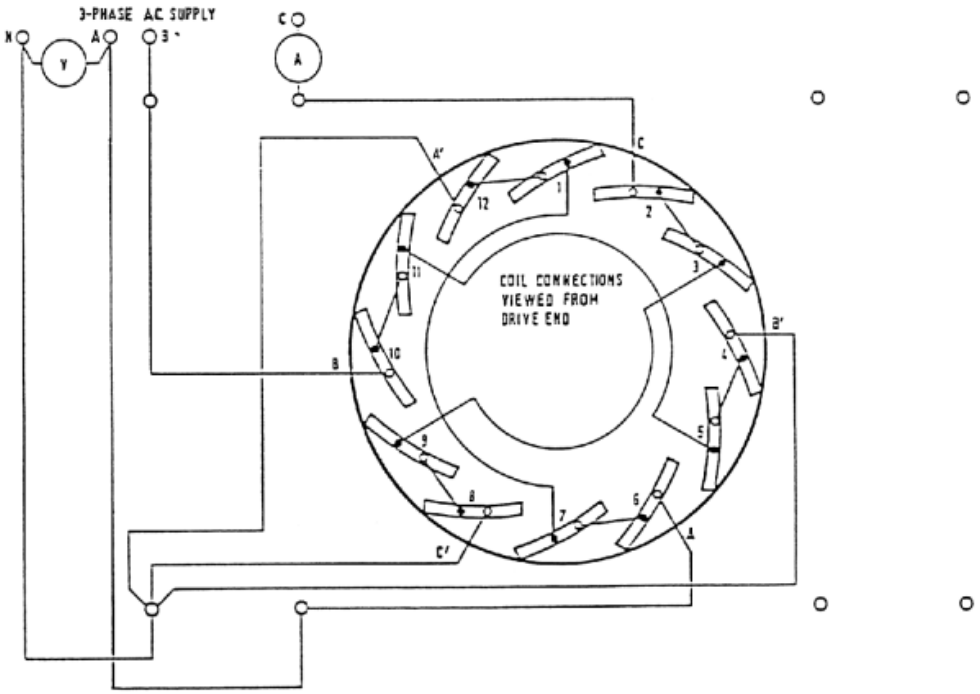


Diagrama para un Motor de Inducción Jaula de Ardilla AC Trifásico de 2 polos en conexión estrella(Y)

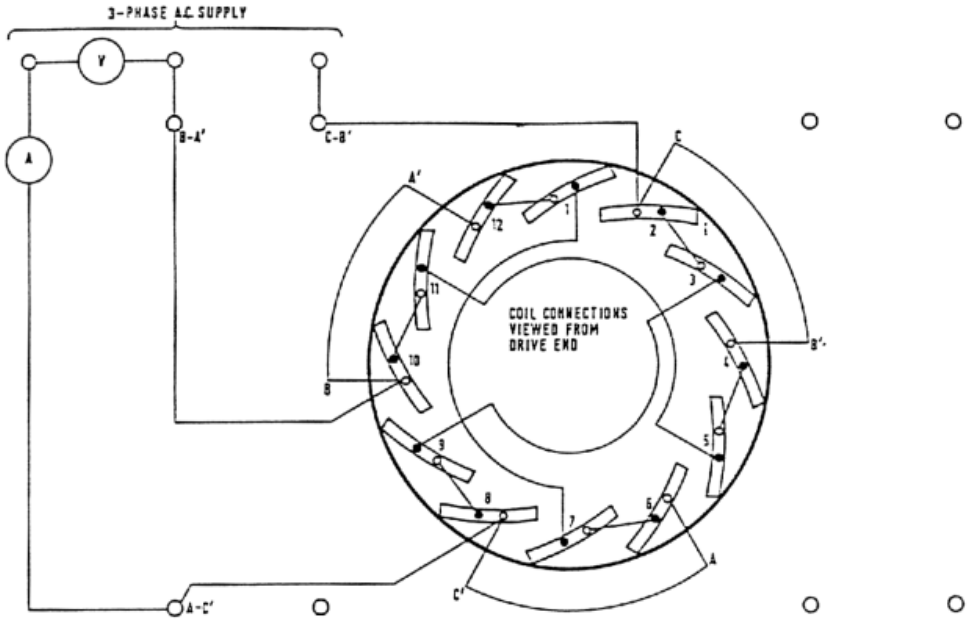
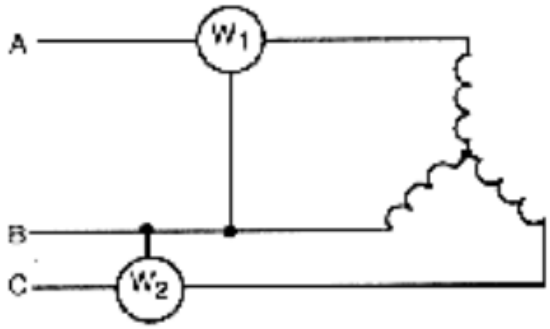


Diagrama para un Motor de Inducción Jaula de Ardilla AC Trifásico de 2 polos en conexión delta (Δ)

2.1.2 Experiencia

Realice conexión estrella y conexión delta (triángulo), coloque el compás de modo de encontrar el campo magnético rotatorio y luego ajuste la jaula de ardilla. Por medio del medidor trifásico lea potencia (activa, reactiva y aparente), corriente, factor de potencia y compare ambos casos (delta y estrella), operando en régimen permanente.
El voltaje de operación según la fuente será 0-230V LINEA y 0-400 V fase - fase

Conecte y encienda el suministro trifásico al motor hasta cuando la velocidad de eje haya alcanzado su valor síncrono. Aumente la carga del freno en los pasos y con voltaje constante tome lecturas de velocidad de eje y corriente para cada valor de carga aplicada. Utilice dos wattmetros para medir la potencia de la entrada al motor como mostrado en la siguiente figura.

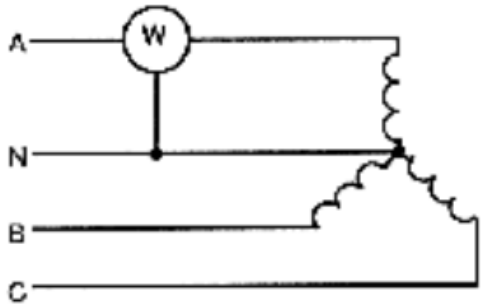


(a)

Medición con dos Wattmetros estrella o delta

$$W1 + W2 - \sqrt{3}V \cdot I \cos\phi$$

Cuando φ > 60° W1 leerá al revés.
Las conexiones al voltaje o corrientes en las bobinas deben ser dadas vuelta y sus lecturas tomadas como negativas



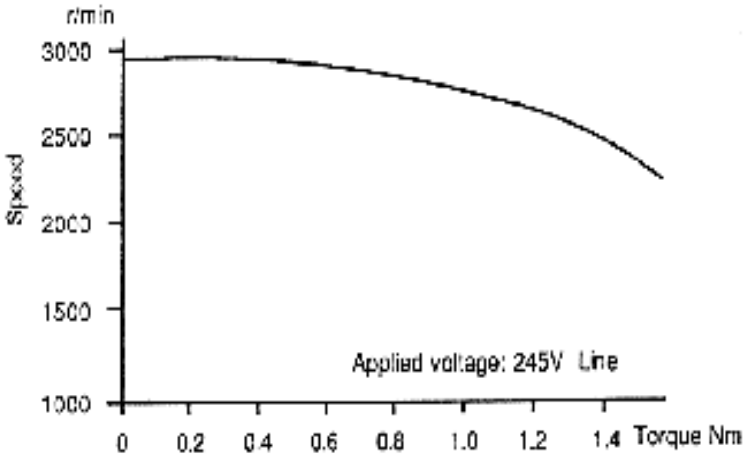
(b)

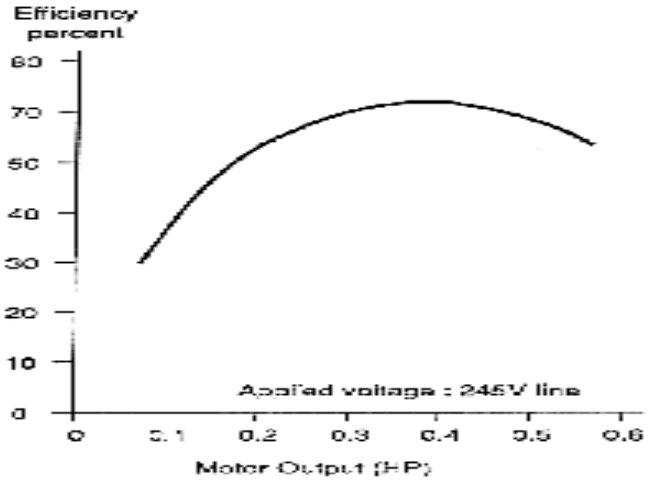
La medición de un Wattmetro en un sistema balanceado en conexión estrella

$$3W - \sqrt{3}V \cdot I \cos\phi$$

tomadas como negativas

Con los datos anteriores pueden calcularse la eficiencia y factor de potencia del motor. Luego se deberán hacer los gráficos de Torque / Velocidad y Eficiencia / Carga, que teóricamente son como se muestra a continuación.


r/min
3000
2500
2000
1500
1000
Speed
Applied voltage: 245V Line
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
Torque Nm

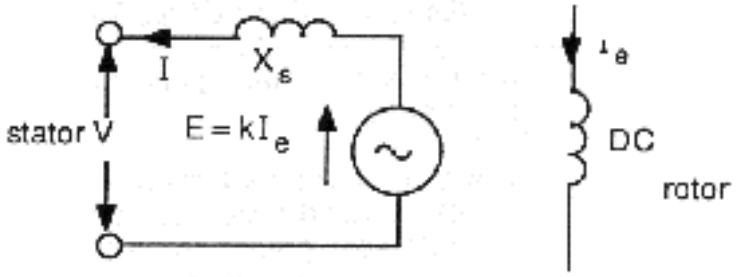

Efficiency
percent
60
70
50
40
30
20
10
0
Applied voltage : 245V line
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
Motor Output (H.P)

3 Generador Síncrono trifásico

Gran parte de la energía mundial es producida por dos tipos de generadores síncronos trifásicos, el de rotor cilíndrico ocupado en centrales termoeléctricas y el de polos salientes ocupado en centrales hidroeléctricas.
Debido a su extensa utilización, se hace indispensable conocer sus características constructivas.

Los elementos de este generador son exactamente igual que los de un motor síncrono.

El circuito equivalente simplificado y el diagrama fasorial para el generador es similar al del motor pero la dirección de flujo de potencia se invierte, como se aprecia en la figura siguiente que es el circuito equivalente, en él Ie es la corriente de excitación de rotor, E es la fem del generada para una velocidad constante, Xs es el reactancia del estator, I es la corriente de carga y V el voltaje terminal.



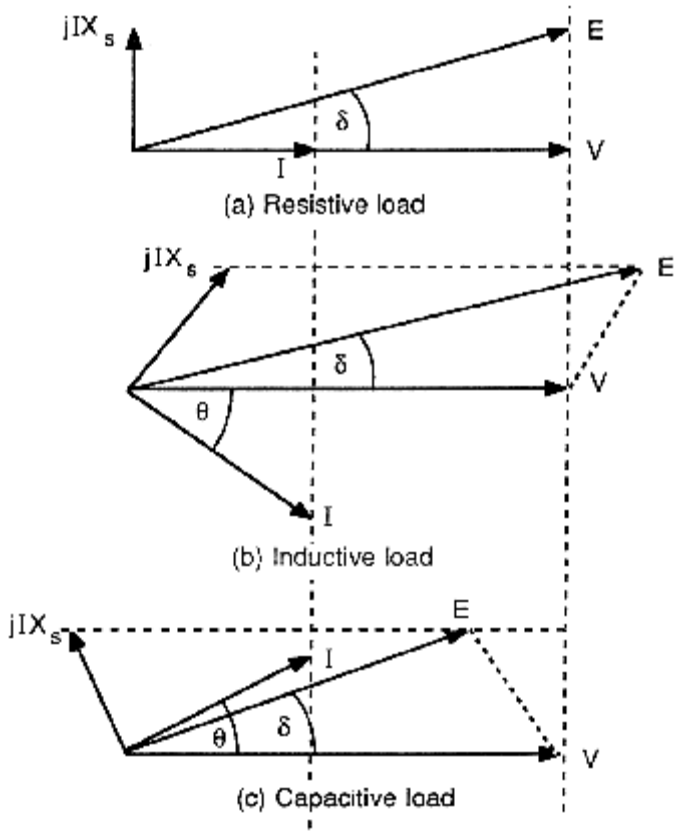
Las ecuaciones para este circuito serán

$$V = E - j \cdot I \cdot X_s$$

o

$$E = V + j \cdot I \cdot X_s$$

El diagrama fasorial correspondiente es dependiente del factor de potencia de la carga que está en que el ángulo de la fase esta entre el voltaje terminal V y la corriente de carga I. En las figuras siguientes se muestran tres casos: el resistivo (la unidad p.f) inductivo (retrasándose p.f) y capacitivo (p.f principal) las cargas.



Estos diagramas asumen una potencia constante a la carga VI cos θ a un voltaje terminal constante y muestra que el valor requerido de E es mayor para una carga inductiva y menor para una capacitiva. Recíprocamente, para una fem constante generada E (la velocidad constante y corriente de excitación también) V aumentaría para una carga capacitiva y reduce para una inductiva.

3.1 Trabajo en Laboratorio

3.1.1 Materiales

Estator:	Instrumentos:
1 Estator distribuido de 12 ranuras	1 fuente 0-20 V DC (60-121)
	1 Voltímetro 0-50 V DC (68-110)
Rotor:	1 Amperímetro 0-5 A DC (68-110)
1 rotor cilíndrico de 4 polos	1 Medidor trifásico (68-100)
2 bobinas L1	1 Motor de Velocidad Variable (VSD177)
1 Colector / Anillos rozantes	1 tacómetro
2 escobillas	
1 Cupla axial	

3.1.2 Experiencia

Conecte y ensamble los componentes del generador síncrono y ensamble la unidad motriz VSD 177. La conexión del estator será del tipo delta y debe disponerse de forma de lograr 1 par de polos por fase (físicamente cada polo queda compuesto por 2 bobinas).

Luego encienda la unidad motriz llevándola a velocidad de 1.500 rpm. y manténgala constante. Encienda la alimentación del rotor (DC) ajustando la corriente desde 0 a 5 A en pasos tomando los valores del voltaje de salida o generado. Grafique curva de voltaje de fase versus corriente rotórica.