



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILÁN

“Uso de herramientas didácticas para la materia de máquinas eléctricas de la carrera de ingeniería mecánica eléctrica (plan 2012) del módulo industrial como apuntes de apoyo”.

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA.**

**PRESENTA:
MIGUEL ÁNGEL MEDINA GARCÍA.**

**ASESOR:
ING. ÁNGEL ISAÍAS LIMA GÓMEZ.**

Cuautitlán Izcalli, Estado de México 2013.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ
Jefa del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos LA TESIS:

“Uso de Herramientas Didácticas Para la Materia de Máquinas Eléctricas de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica del Módulo Industrial como Apuntes de Apoyo”.

Que presenta el pasante: MIGUEL ANGEL MEDINA GARCÍA

Con número de cuenta: 0890764-4 para obtener el Título de: Ingeniero Mecánico Electricista

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

ATENTAMENTE

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 29 de Julio de 2013.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Ing. Ángel Isaías Lima Gómez	
VOCAL	Ing. Sugeil Suárez Piña	
SECRETARIO	Ing. Gilberto Chavarría Ortiz	
1er SUPLENTE	Ing. Melisa Carmen Vargas Olivia	
2do SUPLENTE	Ing. Nidia Mendoza Andrade	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

HHA/Vc

AGRADECIMIENTOS

A LA UNAM

Por permitirme haber hecho mis sueños realidad, dándome la oportunidad de crecer y valorar los conocimientos dentro y fuera de sus instalaciones.

A MIS PADRES

Por su apoyo en todos estos años y darme una formación con valores morales sólida.

A MIS HERMANOS

Por apoyarme en todos los aspectos durante todo el tiempo que he estado estudiando.

A MIS MAESTROS

Por haberme guiado y por haber compartido sus conocimientos conmigo durante mis años de estudio.

A MI ASESOR

Gracias por sus consejos y apoyo para la formulación y conclusión de este trabajo.

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS

Quienes he conocido a lo largo de mi andar, que me han motivado, aconsejado y apoyado para alcanzar mis objetivos que me he trazado en la vida.

Objetivos:

- 1.- Dar a conocer algunos ejercicios y material audio/visual en el desarrollo del tema de transformadores.
- 2.- Desarrollar y aportar algunos ejercicios como apoyo a la asignatura.
- 3.- Mostrar el uso de software para el análisis y comprensión de motores eléctricos.
- 4.- Mostrar información para cada uno de los temas de la materia de máquinas eléctricas (plan 2012), y/o incluir material didáctico y algunos temas complementarios.

INDICE

1.- Conceptos de magnetismo y electromagnetismo*.	1
- Introducción*.	1
- 1.1. Imanes*.	1
- 1.2. Campo magnético de un imán*.	4
- 1.3. Electromagnetismo*.	6
- 1.4. Magnitudes magnéticas*.	9
- 1.5. Curva de magnetización (saturación magnética)*.	13
- 1.6. Histéresis magnética*.	18
- 1.7. Calculo de circuitos magnéticos*.	20
- 1.8. Electroimanes*.	23
- 1.9. Ejercicios*.	28
2.- Transformadores.	39
- 2.1. Estructura del transformador.	39
- 2.2. Funcionamiento.	40
- 2.3. Circuito equivalente.	42
- 2.4. Conexiones trifásicas.	44
- 2.5. Transformadores en paralelo.	48
- 2.6. Autotransformador.	50
- 2.7. Ejercicios de transformadores*.	55
- 2.8. Material didáctico*.	58
3.- Motores de corriente alterna.	59
- 3.1. Estructura.	59
- 3.2. Funcionamiento.	65
- 3.3. Circuito equivalente.	67
- 3.4. Motor trifásico jaula de ardilla.	68
- 3.5. Motor trifásico rotor devanado.	71
- 3.6. Motor monofásico.	73
- 3.7. Motor universal.	81
- 3.8. Aplicaciones.	85
- 3.9. Perdidas en los motores*.	86
- 3.10. Tipos de arranque de motores trifásicos*.	88
- 3.11. Ejercicios*.	98
- 3.12. Material didáctico*.	108
4.- Motores de corriente directa.	115
- 4.1. Estructura.	115
- 4.2. funcionamiento.	115
- 4.3. Circuito equivalente.	119
- 4.4. Motor con excitación independiente.	121
- 4.5. Motor auto excitable.	121
- 4.5.1. Paralelo.	122
- 4.5.2. Serie.	123
- 4.5.3. Compuesto.	125
- 4.6. Diagrama de separación de flujo de potencia para motor de CD*.	126

- 4.7. Cambio de dirección en motores de CD*.	127
- 4.8. Arrancador de reóstato manual*.	128
- 4.9. Ejercicios*.	129
- 4.10. Material didáctico*.	142
5.- Generadores de corriente directa.	143
- 5.1. Estructura.	143
- 5.2. Funcionamiento.	146
- 5.3. Circuito equivalente.	156
- 5.4. Generador con excitación independiente.	157
- 5.5. Generador auto excitable.	157
- 5.5.1. Paralelo.	158
- 5.5.2. Serie.	159
- 5.5.3. Compuesto.	159
- 5.6. Material didáctico*.	160
6.- Generadores de corriente alterna.	161
- 6.1. Estructura.	161
- 6.2. Funcionamiento.	221
- 6.3. Circuito equivalente.	223
- 6.4. Excitación.	229
- 6.4.1. Aplicaciones.	232
- 6.5. Ejercicios*.	233
- 6.6. Material didáctico*.	240
7.- Motores síncronos.	241
- 7.1. Estructura.	241
- 7.2. Funcionamiento.	244
- 7.3. Circuito equivalente.	251
- 7.4. Características.	252
- 7.5. Aplicaciones.	281
- 7.6. Material didáctico*.	281
Conclusiones.	282
Bibliografía.	283

*nota estos temas y ejercicios no están incluidos en el temario de la materia de máquinas eléctricas, área industrial plan 2012; se han incluido aquí como apoyo o complemento para poder entender mejor los demás temas de la materia.

1.- conceptos básicos:

Magnetismo y Electromagnetismo.

Introducción:

El magnetismo tiene que ver con fenómenos de atracción y repulsión que se dan con los imanes y con los materiales ferromagnéticos, y el electromagnetismo con fenómenos magnéticos que aparecen cuando los conductores y bobinas son recorridos por una corriente eléctrica. El estudio de estas dos ciencias es importante, ya que aprovechando estos fenómenos se pueden construir electroimanes, transformadores, motores, generadores de electricidad como los dinamos y alternadores, altavoces, relés y contactores, cerraduras electromagnéticas, cocinas de inducción, detectores de metales, electroválvulas y un sinnúmero más de aplicaciones.

Contenido:

- Imanes.
- Campo magnético de un imán.
- Electromagnetismo.
- Magnitudes magnéticas.
- Curva de magnetización.
- Histéresis magnética.
- Calculo de circuitos magnéticos.
- Electroimanes.

1.1. Imanes.

Si tomamos un imán e intentamos acercar diferentes objetos metálicos, podremos observar que este atrae con fuerza solo aquellos objetos que sean de hierro o acero. Este fenómeno también se da con el níquel y el cobalto. A estos materiales que son susceptibles de ser atraídos por un imán se les conoce con el nombre de materiales ferromagnéticos.

Las aplicaciones de los imanes son muy variadas, ya que con ellos se pueden producir fuerzas mecánicas considerables. Así, por ejemplo se pueden utilizar como separadores magnéticos que dividen materiales magnéticos de no magnéticos. Otras aplicaciones de los imanes son pequeñas dinamos, micrófonos, altavoces, aparatos de medida analógicos y pequeños motores eléctricos de C.C.

Polos de un imán.

Si depositamos una cantidad de limaduras de hierro sobre un imán recto, como la de la figura (1.1), podemos observar que aparece una mayor concentración de estas en los extremos del imán. A su vez también se puede comprobar como esta concentración disminuye hacia el centro, hasta desaparecer prácticamente en el centro.

Las zonas donde se produce la mayor atracción se denominan polos magnéticos. La zona donde no hay atracción se denomina línea neutra.

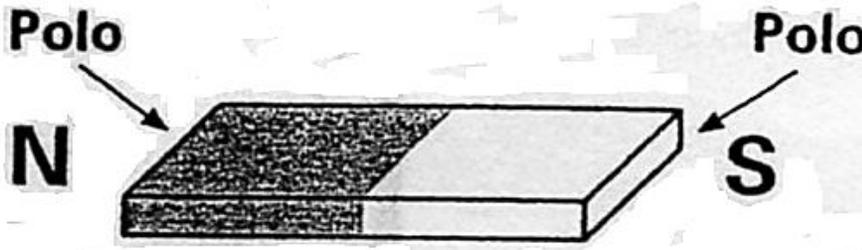


Figura. 1 .1. Polos de un imán.

Brújula.

Una brújula es una aguja imantada que se puede girar libremente en su eje central (figura 1.2). Si nosotros dejamos girar libremente a la aguja imantada de una brújula, esta se orientará siempre con un extremo hacia el polo norte terrestre y el otro hacia el sur. De aquí proviene el nombre de los polos de un imán. Al extremo de la aguja que se orienta hacia el norte geográfico terrestre se le denomina polo norte, y al otro polo sur.



Figura. 1.2. Brújula.

Dado que en los imanes los polos del mismo nombre desarrollan fuerzas de repulsión y los de diferente nombre de atracción, mediante una brújula será fácil determinar los nombres de los polos. Para ello bastara con acercar la brújula a uno de los polos del imán y comprobar si existen atracción o repulsión del polo norte de la misma.

Clases de imanes.

En la naturaleza se pueden encontrar imanes naturales, como la magnetita, que posee ciertas propiedades magnéticas. Ahora bien, si lo que deseamos es potenciar dichas propiedades se pueden fabricar imanes artificiales a partir de sustancias ferromagnéticas.

A su vez, los imanes o sustancias magnetizadas, dependiendo del tipo de sustancia utilizada, una vez magnetizados pueden mantener durante largo tiempo sus propiedades

magnéticas (imanes permanentes) o solo cuando están sometidos a la acción de un campo magnético (imanes temporales).

Como ejemplo de imanes temporales tenemos el hierro puro, y como imán permanente, el acero. Mediante una sencilla experiencia se puede comprobar que al acercar un trozo de acero (por ejemplo un destornillador) a un imán, el acero queda magnetizado, apreciándose sus propiedades de atracción aunque retiremos el imán de dicho trozo de acero. Sin embargo, si utilizamos un trozo de hierro para la experiencia (por ejemplo un clavo de hierro), esta manifiesta propiedades de atracción hacia otros materiales solo cuando está bajo la acción del campo magnético del imán; una vez retirado el imán, dicho trozo de hierro pierde prácticamente todas las propiedades magnéticas adquiridas.

Para la construcción de imanes permanentes se utilizan aleaciones de acero-tungsteno, acero-cobalto, acero-al titanio, hierro-níquel-aluminio-cobalto, etc.

Los imanes temporales son de gran utilidad para la construcción de núcleos para electroimanes, motores, generadores y transformadores. En estos casos se emplea la chapa de hierro aleada, por lo general; con silicio.

Teoría molecular de los imanes.

Si rompemos un imán en dos, las dos partes resultantes son dos imanes completos con sus polos correspondientes. Si volviésemos a romper una de estas partes obtendríamos otros dos nuevos imanes. Este proceso se puede repetir multitud de veces, hasta alcanzar lo que vendremos a llamar molécula magnética.

Según esta teoría, se puede suponer que un imán está compuesto de moléculas magnéticas perfectamente orientadas con los polos respectivos del imán (figura 1.3a). Un trozo de hierro sin imantar está compuesto de moléculas magnéticas totalmente desorientadas (figura 1.3b).

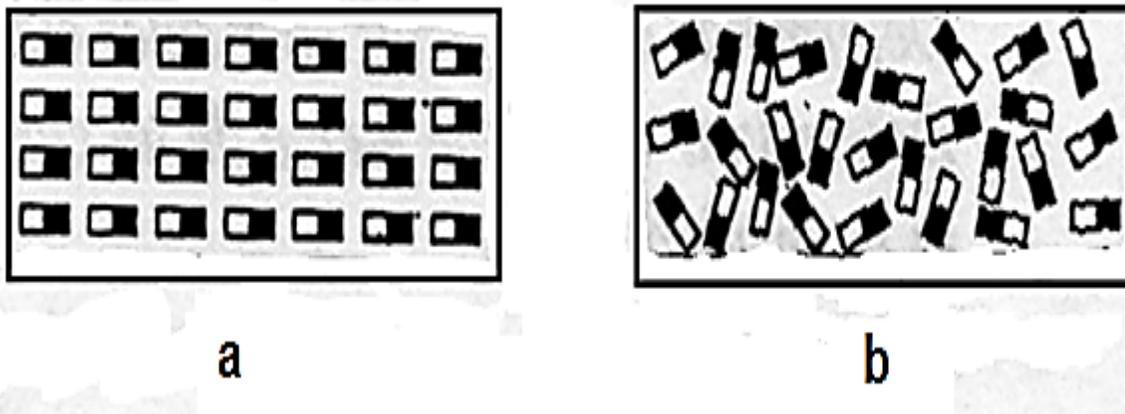


Figura. 1.3. Moléculas magnéticas de un imán (a) y de un trozo de hierro (b).

Esta teoría nos servirá de gran ayuda para comprender fenómenos complejos, como la permeabilidad, la saturación magnética, histéresis, etc., que estudiaremos más adelante.

Gracias a esta teoría también podremos entender más fácilmente el comportamiento de los materiales magnéticos utilizados para la elaboración de imanes permanentes y artificiales. En el caso de los imanes permanentes, aparece una especie de rozamiento interno entre las moléculas magnéticas que dificulta el retorno al estado inicial una vez orientadas. Al contrario, en los imanes temporales las moléculas magnéticas se ordenan y desordenan con facilidad, en función de la influencia ejercida por la acción de un campo magnético externo al mismo.

Las propiedades magnéticas de los imanes se ven alteradas por la temperatura; así, por ejemplo, el hierro puro pierde totalmente su magnetismo por encima de los 769°C . Por otro lado, si golpeamos fuertemente un trozo de acero imantado se puede modificar sus propiedades magnéticas. Esto es debido a que los golpes pueden cambiar el orden de las moléculas magnéticas.

1.2. Campo magnético de un imán.

Se puede decir que el campo magnético es el espacio, próximo al imán, en el cual son apreciables los fenómenos magnéticos originados por dicho imán.

El campo magnético de un imán es más intenso en unas partes que otras. Así. Por ejemplo, el campo magnético adquiere su máxima intensidad en los polos, disminuyendo paulatinamente según nos alejamos de ellos. Para poder hacernos una idea del aspecto que tiene el campo magnético, o sea, de su espectro magnético, realiza el siguiente experimento:

Experimento (1.2.1). Se toma un imán sobre el que se coloca una lámina de plástico transparente y se espolvorea con limaduras de hierro, procurando que queden uniformemente repartidas por toda la superficie de la lámina de plástico transparente. Las limaduras de hierro se orientan sobre la misma dibujando la forma del campo magnético (figura 1.2.1).

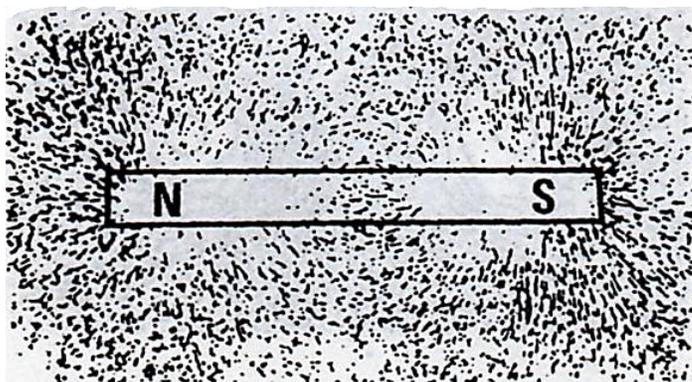


Figura. 1.2.1. Campo magnético.

Observa que hay más limaduras concentradas en los extremos, y que existen unas cadenas de limaduras formando unas líneas que van de un polo a otro. A estas cadenas se les conoce por el nombre de líneas de fuerza del campo magnético.

Las líneas de campo se pueden dibujar tal como se muestra en la figura (1.2.2). Las líneas de fuerza únicamente representan la forma del campo magnético. Ahora bien, por motivos de convencionalismos teóricos, se les da un sentido de circulación, de tal forma que se dice que las líneas de campo salen por el polo norte del imán, recorren el espacio exterior y entran por el polo sur. El sentido de circulación de estas líneas por el interior del imán es de sur a norte.

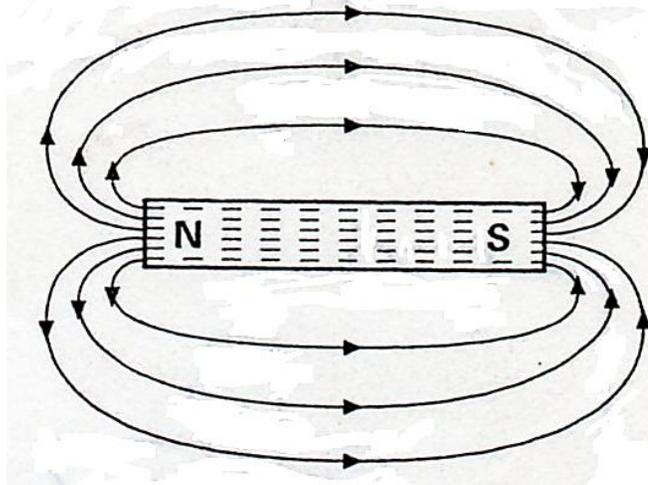


Figura. 1.2.2. Líneas de fuerza del campo magnético.

La visualización de las líneas de campo resulta interesante, ya que conociendo su dirección podemos determinar la polaridad del campo magnético. Además, la mayor o menor concentración de las mismas nos indica lo intenso que es el campo en una determinada zona.

En la figura (1.2.3), se puede observar que cuando acercamos dos imanes por sus polos iguales, las líneas de campo se repelen.

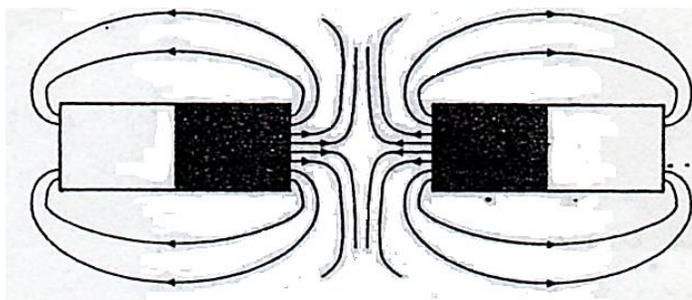


Figura. 1.2.3. Repulsión de dos imanes.

Sin embargo, si acercamos dos imanes por sus polos opuestos (figura 1.2.4.), las líneas de campo se establecen en la misma dirección y se suman.

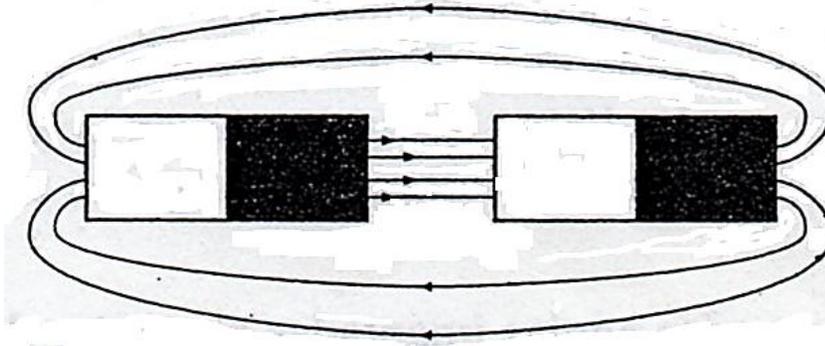


Figura. 1.2.4. Atracción de dos imanes.

1.3. Electromagnetismo.

Los imanes producen un campo magnético considerable, pero para ciertas aplicaciones este resulta todavía muy débil. Para seguir campos más intensos utilizaremos bobinas fabricadas con conductores eléctricos, que al ser recorridos por una corriente eléctrica desarrollan campos magnéticos, cuya intensidad depende fundamentalmente de la intensidad de la corriente y del número de espiras de la bobina.

Campo magnético creado por un conductor cuando es atravesado por una corriente.

Si nosotros espolvoreamos limaduras de hierro sobre una hoja de papel que es atravesada por un conductor por donde circula una corriente eléctrica (figura 1.3.1), observaremos que las limaduras se orientan y forman un espectro magnético de forma circular (figura 1.3.2).

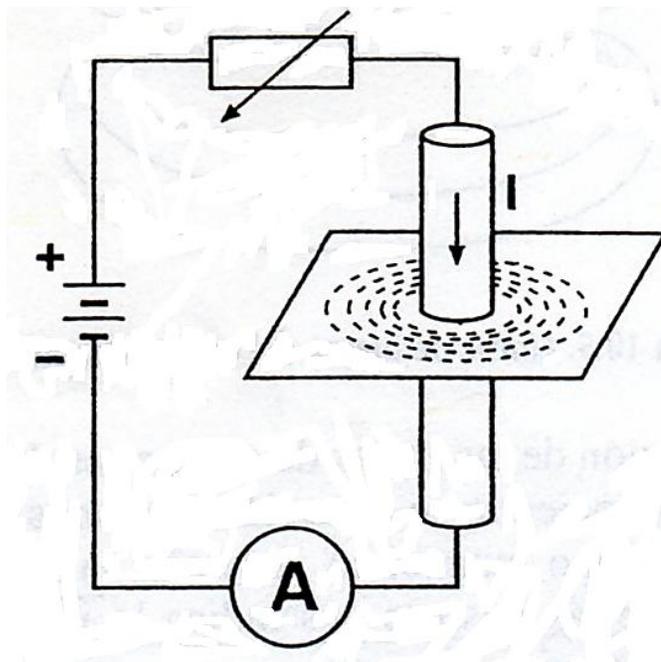


Figura. 1.3.1.

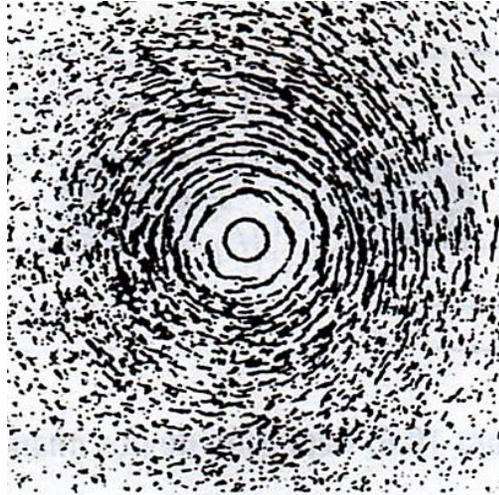


Figura. 1.3.2. Espectro magnético de un conductor.

Esto demuestra que cuando un conductor es atravesado por una corriente eléctrica, a su alrededor aparece un campo magnético. Observando el espectro del campo magnético se puede apreciar que las líneas de fuerza toman la forma de círculos concéntricos que se cierran a lo largo de todo el conductor.

Si situamos varias agujas imantadas alrededor del conductor, podremos observar que su orientación depende del sentido de la corriente. Para determinar el sentido de las líneas de fuerza de una forma sencilla, se aplica la regla del sacacorchos o de Maxwell que dice así: el sentido de las líneas de fuerza, concéntricas al conductor, es el que indicara el giro de un sacacorchos que avanzase en el mismo sentido que la corriente (figura 1.3.3).

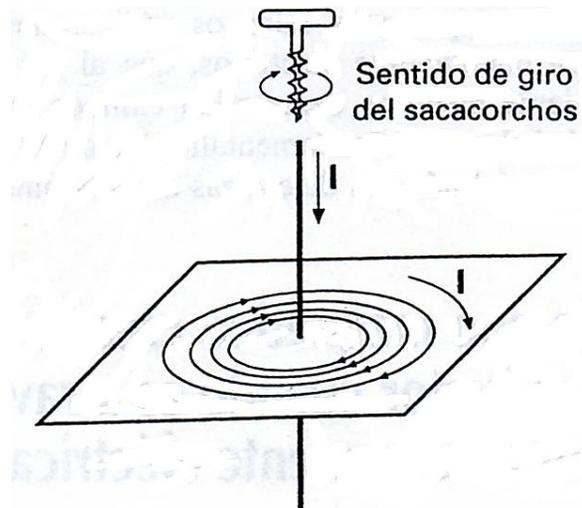


Figura. 1.3.3. Regla del sacacorchos o de Maxwell.

*Nota para aplicar correctamente esta regla se emplea el sentido convencional de la corriente.

La intensidad del campo magnético desarrollado por el conductor depende fundamentalmente de la intensidad de la corriente que fluye por el conductor. A más intensidad de corriente, más intensidad de campo.

Campo magnético en un conductor en forma de anillo.

Un conductor recto produce un campo magnético muy disperso y, por tanto, muy débil. La forma de conseguir que el campo magnético sea más fuerte es disponiendo el conductor en forma de anillo.

El sentido de las líneas de fuerza de una parte del conductor se suma a la del otro, formando un cuerpo magnético mucho más intenso en el centro de la espira (figura 1.3.4). En la figura (1.3.5), se puede apreciar el efecto de concentración de las líneas de campo en el centro del anillo al que, como en otras ocasiones, se le ha realizado el espectro magnético con limaduras de hierro.

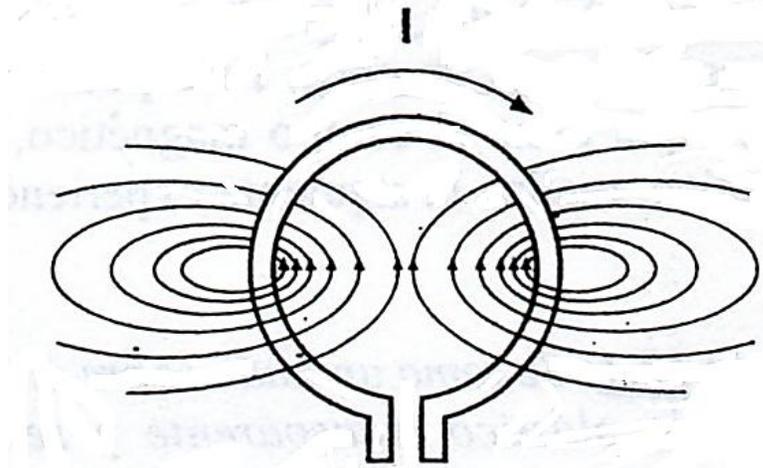


Figura. 1.3.4.

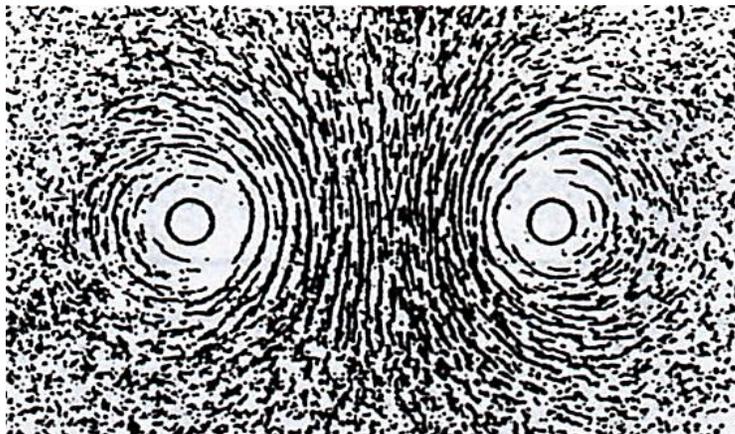


Figura. 1.3.5. Espectro magnético de una espira.

Campo magnético formado por una bobina.

En una bobina, el campo magnético de cada espira se suma al de la siguiente, concentrándose este en el centro de la misma. El campo, resultante es uniforme en el centro de la espira y mucho más intenso que en el exterior. En los extremos de la bobina se forman polos magnéticos (figura 1.3.6). Para determinar el sentido de fuerza se aplica la regla del sacacorchos, pero de otra forma, basta con girar el sacacorchos, en el mismo sentido de giro que la corriente eléctrica por las espiras. El sentido de avance del sacacorchos nos indica el sentido de las líneas de fuerza. Una vez determinado este sentido, bien fácil es determinar los polos de la bobina (el polo norte estará situado en el extremo por donde salen las líneas de fuerza, y el sur por donde entran).

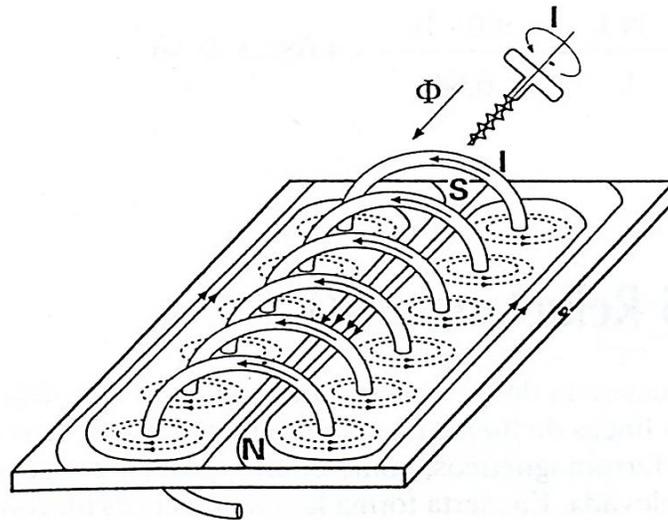


Figura. 1.3.6. Campo magnético de una bobina.

1.4. Magnitudes magnéticas.

Al igual que para definir el comportamiento de un circuito eléctrico utilizamos las magnitudes eléctricas, para definir los campos electromagnéticos utilizamos las magnitudes magnéticas.

Flujo magnético (Φ).

El campo magnético se representa a través de las líneas de fuerza. La cantidad de estas líneas se le denomina flujo magnético.

Se representa por la letra griega Φ ; sus unidades son:

- El weber (Wb), en el sistema internacional.
- El maxvelio, en sistema CGS* (Mx).

La relación que existe entre ambas unidades es $1 \text{ Wb} = 10^8 \text{ Mx}$.

*sistema cegesimal: es un sistema de unidades basado en el centímetro, el gramo y el segundo.

Inducción magnética (B).

La inducción magnética se define como la cantidad de líneas de fuerza que atraviesa perpendicularmente la unidad de superficie. En cierta forma, nos indica lo densas que son las líneas de fuerza, o lo concentradas que están, en una parte del campo magnético.

Se representa por la letra griega B; sus unidades son:

- La tesla (T), en el sistema internacional.
- El gauss (Gs), en el sistema cgs.*

la relación que existe entre ambas unidades es $1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gs}$.

Se dice que existe una inducción de un tesla cuando el flujo de un weber atraviesa perpendicularmente una superficie de un metro cuadrado.

$$1 \text{ tesla} = \frac{1 \text{ weber}}{1 \text{ m}^2}$$

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

Ejemplo: 1.4.1.

¿Cuál es la inducción magnética existente en la cara plana del polo de un imán recto de 30 cm^2 de superficie cuando es atravesado por un flujo magnético de $0,009 \text{ Wb}$?

Solución: $B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,009}{0,003} = 3 \text{ T}$

$$30 \text{ cm}^2 = 30 / 10.000 = 0,003 \text{ m}^2$$

Ejemplo 1.4.2

¿Cuál será el flujo magnético que existe en el campo magnético producido por una bobina si esta tiene un núcleo de 20 cm^2 de superficie y la inducción magnética en la misma es de $1,5 \text{ teslas}$?

Solución: despejando la fórmula general:

$$\Phi = B \cdot S = 1,5 \cdot 0,002 = 0,003 \text{ Wb} = 3 \text{ mWb} (\text{miliweber})$$

Fuerza magnetomotriz (\mathcal{F}).

Se puede decir que es la capacidad que posee la bobina de generar líneas de fuerza en un circuito magnético. La fuerza magnetomotriz aumenta con la intensidad de la corriente que fluye por la bobina y con el número de espiras de la misma.

$$\mathcal{F} = N \cdot I$$

\mathcal{F} = fuerza magnetomotriz en amperio-vuelta (Av.).

N = número de espiras.

I = intensidad de corriente (A)

Ejemplo 1.4.3

Para el funcionamiento de un electroimán se necesita una fuerza magnetomotriz de 500 Av. Indicar dos posibilidades de conseguirlo.

Solución: si fabricamos una bobina con 500 espiras, el número de amperios que tendremos que hacer pasar por ella será de:

$$\mathcal{F} = N \cdot I, \text{ despejando } I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{500}{500} = 1 \text{ A}$$

¿Y si la fabricamos con 100 espiras? $I = \frac{500}{100} = 5 \text{ A}$

Para la fabricación de electroimanes muy potentes, como por ejemplo los que se utilizan para suspender en un colchón magnético un tren de alta velocidad sobre un monorraíl, se necesitan fuerzas magnetomotrices muy elevadas. Es decir, bobinas con muchas espiras que son atravesadas por grandes intensidades de corriente. Para evitar fabricar bobinas de grandes dimensiones se utilizan materiales superconductores. De esta forma se consiguen potentísimos campos magnéticos con pocas espiras y corrientes de miles de amperios, que no calientan los superconductores por el efecto Joule por carecer estos de resistencia eléctrica.

Intensidad de campo magnético (H).

Nos indica lo intenso que es el campo magnético. La intensidad de campo en una bobina depende de la fuerza magnetomotriz ($N \cdot I$). Ahora bien, cuanto más larga sea la bobina, más se dispersan las líneas de campo, dando como resultado una intensidad de campo más débil; por lo que se puede decir que, para una fuerza magnetomotriz constante, la intensidad de campo (H) es inversamente proporcional a la longitud media de las líneas de campo, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$H = \frac{N \cdot I}{L}$$

H = intensidad del campo en amperio-vuelta/metro (Av. /m).

N = N^0 de vueltas de la bobina.

I = intensidad de la corriente(A)

L = longitud de la bobina (m)

Ejemplo 1.4.4

Calcular la intensidad del campo en el interior de la bobina de la figura (1.4.4). El número de espiras de la misma es de 300 y la corriente 10 A.

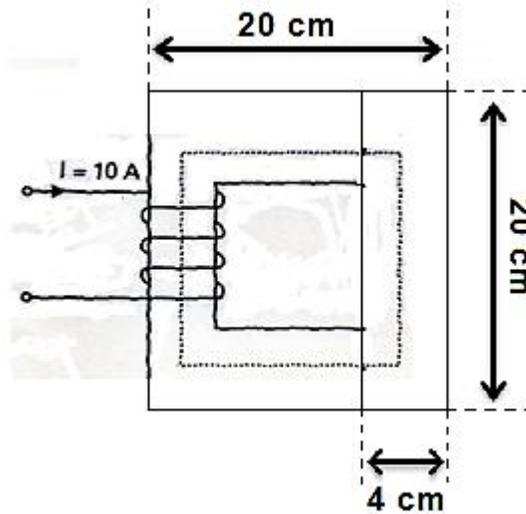


Figura. 1.4.4.

Solución: primero determinamos la línea media por donde se van a establecer las líneas de campo. Para ello observamos las dimensiones del núcleo de la bobina:

$$L = 16 + 16 + 16 + 16 = 64 \text{ cm} = 0,64 \text{ m}$$

$$H = \frac{N I}{L} = \frac{300 \cdot 10}{0,64} = 4.687,5 \text{ Av/m}$$

Reluctancia (\mathfrak{R}).

La reluctancia de un material nos indica si este deja establecer las líneas de fuerza en mayor o menor grado. Los materiales no ferromagnéticos, como el aire, poseen una reluctancia muy elevada. En cierta forma la reluctancia es un concepto similar al de

resistencia en un circuito eléctrico, hasta tal punto que podemos establecer una ley de Ohm para los circuitos magnéticos el flujo que se establece en un circuito magnético es proporcional a la fuerza magnetomotriz proporcionada por la bobina e inversamente proporcional a la reluctancia del medio por donde se establecen las líneas de fuerza del campo magnético.

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathfrak{R}}$$

Esta expresión también se conoce por la ley de Hopkinson.

La reluctancia es una característica propia de cada material magnético, y de la ley de Hopkinson se deduce que:

$$\mathfrak{R} = \frac{\mathcal{F}}{\Phi}$$

Las unidades que le corresponden son: Av. / Wb.

Ejemplo 1.4.5.

Calcular la reluctancia que posee el núcleo de un electroimán si al hacer circular 5 A por la bobina de 1.000 espiras se ha establecido un flujo magnético de 5 mWb.

Solución: la fuerza magnetomotriz de la bobina del electroimán es:

$$\mathcal{F} = N \cdot I = 1.000 \cdot 5 = 5.000 \text{ Av}$$

Si se establecen en el núcleo de hierro 5 mWb significa que su reluctancia es:

$$\mathfrak{R} = \frac{\mathcal{F}}{\Phi} = \frac{5.000}{0,005} = 1.000.000 \text{ Av/Wb}$$

1.5. Curva de magnetización. (Saturación magnética).

Cuando se somete una sustancia a la acción de un campo magnético creciente H, la inducción magnética que aparece en la misma también aumenta en una relación determinada. Por lo general, esta relación (B-H) no es constante, por lo que es de gran utilidad conocer la curva de magnetización, que representa el valor de la inducción en función de la intensidad de campo en cada material.

En la curva de la figura (1.5.1), se ha representado la relación B-H de un hierro dulce. En ella se puede apreciar que para los valores de intensidad de campo de hasta 2000 Av. /m (tramo a-b), la inducción magnética crece proporcionalmente hasta 0,2 T. A partir de este punto aparece un punto de inflexión en la curva, y a aumentos de la intensidad de campo le corresponden aumentos pequeñísimos de inducción magnética. A partir de ese punto se dice que el hierro ha alcanzado la saturación magnética.

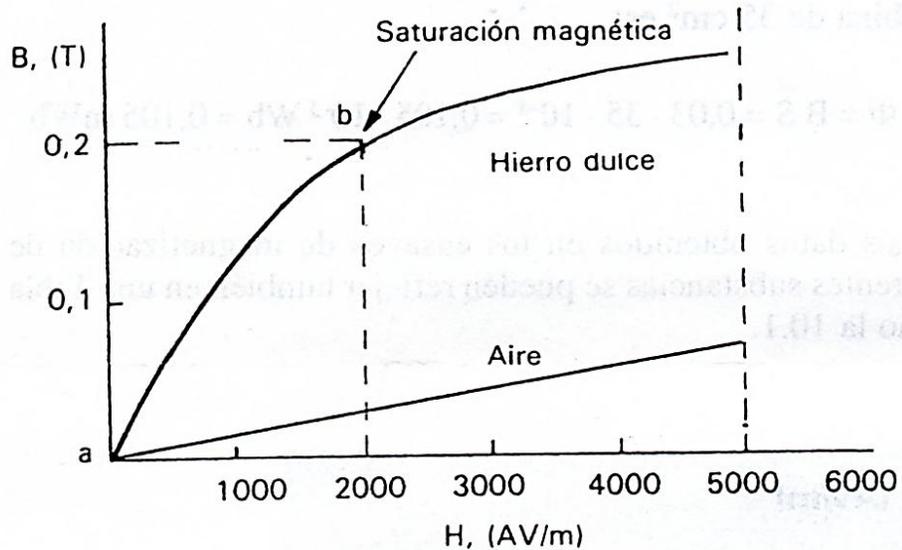


Figura. 1.5.1. Curva de magnetización.

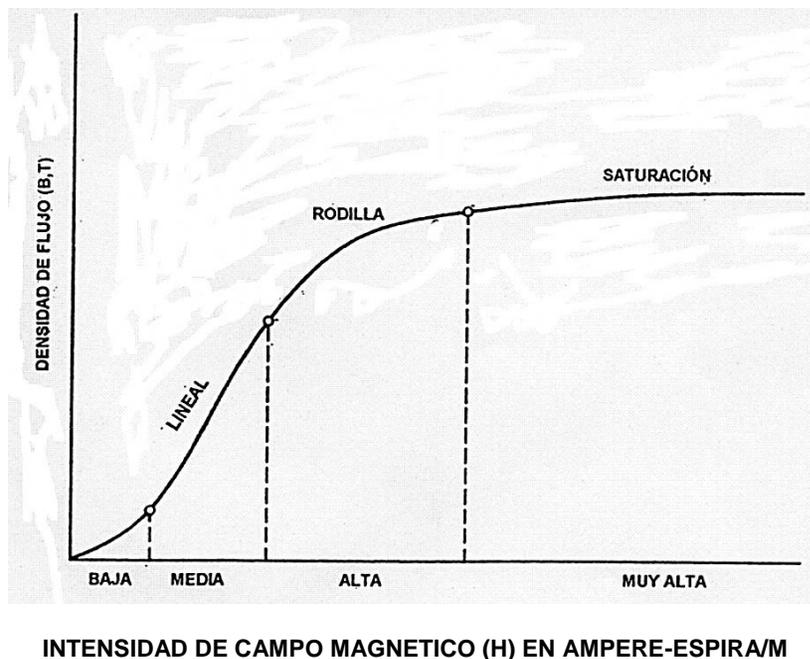


Figura. 1.5.2. Curva de magnetización ilustrando las cuatro secciones principales.

Para explicar el fenómeno de la saturación magnética se puede recurrir a la teoría molecular de los imanes: cuando se introduce en una bobina un núcleo de una sustancia ferromagnética y se hace circular una corriente eléctrica por dicha bobina, aparece un campo magnético en su interior, de intensidad H , que orienta un cierto grado las moléculas magnéticas de dicha sustancia; lo que refuerza el campo con una inducción B . Un aumento de la intensidad de la corriente trae como consecuencia un aumento de H ; lo que hace orientarse un poco más las moléculas magnéticas que se ve reflejado en un nuevo aumento de la inducción. Si seguimos aumentando la intensidad de la corriente, y con ella H , llega un momento en que las moléculas magnéticas están ya totalmente orientadas, y

por mucho que se aumente la intensidad del campo, este ya no se ve reforzado. Se ha alcanzado la saturación magnética.

En la figura (1.5.1), también se ha incluido la curva de magnetización del aire, donde se observa un crecimiento pequeño pero constante de la inducción magnética alcanzada respecto a la intensidad de campo de la bobina.

Permeabilidad magnética.

Se puede comprobar experimentalmente que al introducir en el núcleo de una barra de hierro, se aprecia un notable aumento de las propiedades magnéticas de dicha bobina. Por esta razón, siempre que deseamos producir campos magnéticos intensos utilizaremos núcleos de hierro, como es el caso de los electroimanes.

Cuando se introduce en el núcleo de una bobina una sustancia ferromagnética, se aprecia un aumento de líneas de fuerza en el campo magnético. Si llamamos B_0 a la inducción magnética que produce el electroimán con un núcleo de aire, y B a la inducción magnética conseguida al introducir una sustancia ferromagnética, tendremos que:

$$B = \mu_r \cdot B_0$$

μ_r es el poder que posee la sustancia ferromagnética de multiplicar las líneas de campo. A este parámetro se le conoce por el nombre de permeabilidad. En este caso, se trata de la permeabilidad relativa con respecto al aire o al vacío.

Este fenómeno lo podemos explicar valiéndonos de la teoría molecular de los imanes: la bobina con núcleo de aire produce un número determinado de líneas de fuerza. Al introducir un trozo de hierro, este se ve sometido a la acción de estas líneas de fuerza y sus moléculas magnéticas tienden a orientarse. El núcleo de hierro ahora es un imán temporal que refuerza la acción del campo magnético original.

En la práctica, es más usual utilizar el concepto de permeabilidad absoluta (μ). Esta nos relaciona la intensidad de campo que produce la bobina (H) con el nivel de inducción magnética alcanzando al introducir una sustancia ferromagnética en el núcleo.

$$\mu = \frac{B}{H}$$

O lo que es lo mismo: $B = \mu \cdot H$, donde se puede apreciar el poder multiplicador de la permeabilidad.

Las unidades de permeabilidad en el SI se dan en Henrio/metro (H/m).

Cada sustancia magnética tiene su propio coeficiente de permeabilidad. Cuando mayor es este coeficiente, mejores propiedades magnéticas poseerán estas sustancias. Como ya estudiaremos a continuación, la permeabilidad de los materiales no es constante, y depende sobretodo de los niveles de inducción a que se someta a los mismos.

La permeabilidad del aire o al vacío en el S. I. es:

$$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} H/m$$

Con esta expresión relacionamos la permeabilidad absoluta con la relativa:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Ejemplo 1.5.1.

Determinar la permeabilidad absoluta y relativa que aparecerá en el núcleo de hierro de un electroimán si se ha medido un flujo magnético de 5 mWb. Los datos que se conocen son: $N = 500$ espiras; $I = 15 A$; longitud media del núcleo = 30 cm; superficie recta del núcleo = 25 cm².

Solución: primero calculamos la inducción magnética:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,005}{0,0025} = 2 T$$

La intensidad de campo en la bobina es:

$$H = \frac{N \cdot I}{L} = \frac{500 \cdot 15}{0,3} = 25.000 Av/m$$

La permeabilidad absoluta es entonces:

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{2}{25.000} = 0,00008 H/m$$

La permeabilidad relativa:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{0,00008}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 64$$

Este último resultado nos indica que las líneas de campo son 64 veces mayor con el núcleo de hierro que con un núcleo de aire.

Ejemplo 1.5.2.

Una bobina posee 300 espiras, una longitud de 24 cm y esta bobina sobre un cilindro de 35 cm² de sección. Determinar la inducción (el flujo magnético alcanzado) si el núcleo es de aire y se hace circular por la bobina una corriente de 20 A.

Solución: primero determinamos la intensidad del campo magnético generado por la bobina:

$$H = \frac{N \cdot I}{L} = \frac{300 \cdot 20}{0,24} = 25.000 \text{ Av/m}$$

Aplicando el concepto de permeabilidad absoluta, tendremos que el nivel de inducción alcanzado con un núcleo de aire es:

$$B = \mu_0 \cdot H = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 25.000 = 0,03 \text{ T}$$

El flujo magnético para una sección transversal de la bobina de 35 cm² es:

$$\Phi = B S = 0,03 \cdot 35 \cdot 10^{-4} = 0,105 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} = 0,105 \text{ mWb}$$

Los datos obtenidos en los ensayos de magnetización de diferentes sustancias se pueden reflejar también en una tabla como la (1.5.1).

B (T)	H (Av./m)		
	Hierro forjado	Chapa normal	Chapa al silicio
0,1	80	50	90
0,3	120	65	140
0,5	160	100	170
0,7	230	180	240
0,9	400	360	350
1,1	650	675	530
1,3	1000	1200	1300
1,5	2400	2200	5000
1,6	5300	3500	9000
1,7	7000	6000	15500
1,8	11000	10000	27500
1,9	17000	16000	
2	27000	32000	

Tabla. 1.5.1. Relación entre H y B para diferentes niveles de inducción de varias sustancias ferromagnéticas.

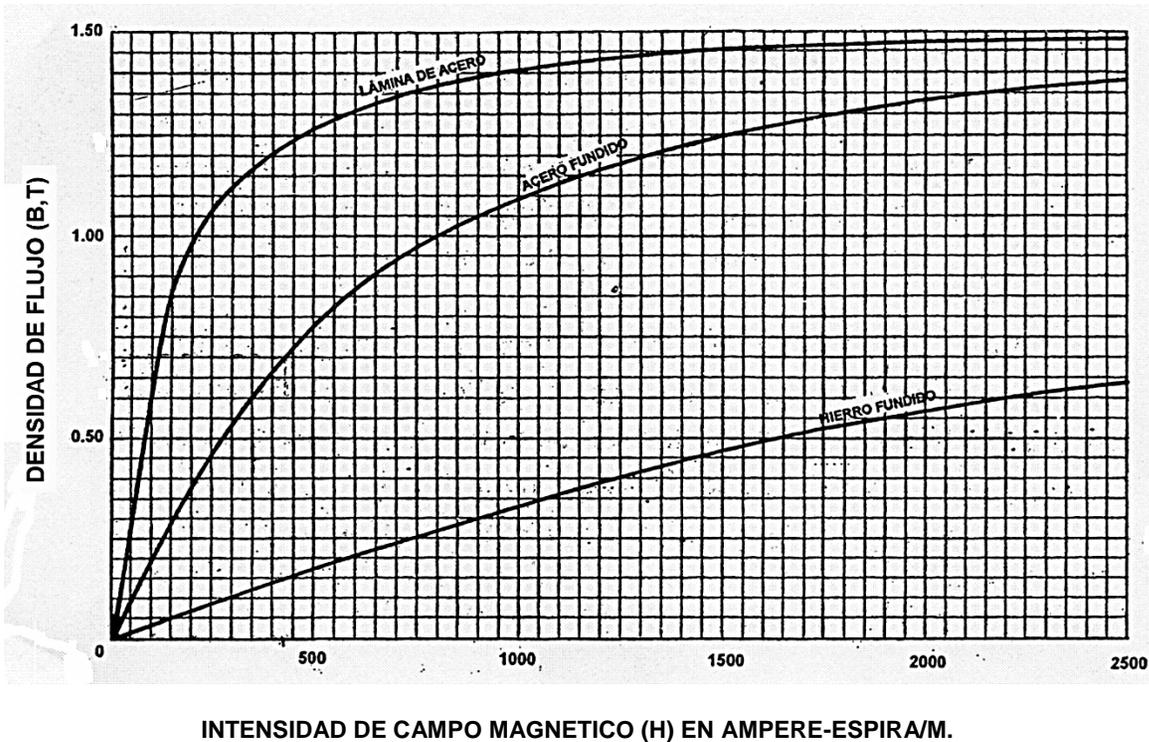


Figura. 1.5.2. Curvas B-H para materiales ferromagnéticos comúnmente usados.

Con la ayuda de los datos de la tabla (1.5.1), es posible comprobar que la permeabilidad de un material no es constante. Tomemos, por ejemplo, la chapa de silicio y calculemos la permeabilidad para los siguientes niveles de inducción: a) 0,7 T; b) 1,3 T, y c) 1,8 T.

$$a) \mu = \frac{B}{H} = \frac{0,7}{240} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ H/m}$$

$$b) \mu = \frac{B}{H} = \frac{1,3}{1300} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ H/m}$$

$$c) \mu = \frac{B}{H} = \frac{1,8}{27500} = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ H/m}$$

En conclusión, la permeabilidad se hace más pequeña según nos acercamos a los niveles de saturación magnética.

1.6. Histéresis magnética.

El estudio de la histéresis tiene una gran importancia en los materiales magnéticos, ya que este fenómeno produce pérdidas en los núcleos de los electroimanes cuando son sometidos a la acción de campos magnéticos alternos. Estas pérdidas se transforman en calor y reducen el rendimiento de los dispositivos con circuitos magnéticos, como transformadores, motores, generadores, etc.

La palabra histéresis significa remanencia. Después de someter a una sustancia ferromagnética a la acción de un campo magnético, cuando este desaparece, la sustancia manifiesta todavía un cierto nivel de inducción magnética, que recibe el nombre de magnetismo remanente.

En la figura (1.6.1), se muestra el aspecto de la curva de magnetización en una sustancia ferromagnética cuando es sometida a intensidades de campo magnético alternos.

En el punto 0 la sustancia no ha sido magnetizada nunca y, en consecuencia, la inducción magnética es nula.

En el tramo (0-a) se va aumentando la intensidad de campo H , con lo que se consiguen valores crecientes de inducción hasta llegar a la saturación.

En tramo (a-b) se va reduciendo la intensidad de campo en la bobina. La inducción también se reduce, pero no en la misma proporción que antes. En el punto (b) se ha anulado la intensidad de campo, sin embargo, la sustancia manifiesta todavía un cierto, magnetismo remanente (B_r).

En el tramo (b-c) se invierte el sentido del campo magnético (esto se consigue invirtiendo el sentido de la corriente eléctrica que alimenta la bobina del ensayo). En el punto (c) la inducción es cero; se ha conseguido eliminar por completo el magnetismo remanente. Para ello, ha habido que aplicar una intensidad de campo (H_c), conocida por el nombre de campo coercitivo.

En el tramo (c-d) se sigue aplicando una intensidad de campo negativo, con lo que se consiguen niveles de inducción negativos hasta alcanzar la saturación.

En los tramos (d-e), (e-f) y (f-a) se completa el ciclo de histéresis. La curva no pasa otra vez por el punto (0) debido a la histéresis.

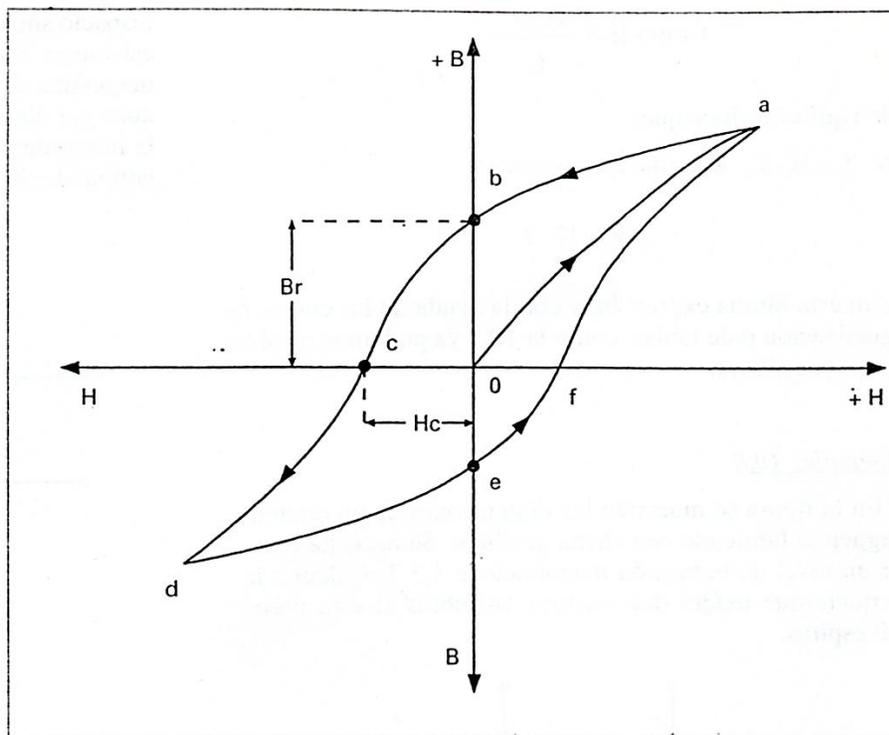


Figura. 1.6.1. Ciclo de histéresis.

Las pérdidas que se originan en los materiales ferromagnéticos debido a la histéresis son proporcionales al área del ciclo. Si nos fijamos en el ciclo, esta área aumenta en gran manera cuando el campo coercitivo H_c es grande. Por esta razón, cuando se eligen materiales ferromagnéticos para la construcción de aparatos que van a funcionar con corriente alterna, se procura que posean un campo coercitivo lo más pequeño posible.

Sin embargo, para la fabricación de imanes permanentes se eligen materiales que posean un campo coercitivo lo más grande posible.

Las pérdidas por histéresis en materiales sometidos a campos producidos por corrientes alternas aumentan con la frecuencia (cuanto más ciclos de histéresis se den por segundo, más calor se producirá).

También la histéresis se puede explicar mediante la teoría molecular de los imanes: al someter a un trozo de hierro a un campo alterno, las moléculas magnéticas se ven forzadas a girar en uno y otro sentido, produciéndose una especie de rozamiento molecular que produce calor. Este calor es más grande cuanto más se resisten las moléculas a cambiar de posición.

1.7. Cálculo de circuitos magnéticos.

Se puede decir que un circuito magnético es por donde se establecen las líneas de campo. Para determinar la fuerza magnetomotriz (los amperios-vuelta) que se debe aportar una bobina a un circuito magnético para conseguir un determinado nivel de inducción magnética se utiliza la siguiente expresión:

$$H = \frac{N \cdot I}{L}$$

De aquí se deduce que:

$N \cdot I = H \cdot L$, O lo que es lo mismo:

$$\mathcal{F} = H \cdot L$$

Con esta última expresión, y con la ayuda de las curvas de magnetización o de tablas, como la 10.1 ya podemos resolver algunas cuestiones.

Ejemplo 1.7.1.

En la figura se muestran las dimensiones de un circuito magnético fabricado con chapa al silicio. Se necesita obtener un nivel de inducción magnética de 1,3 T. Calcular la corriente que tendrá que recorrer la bobina si esta posee 750 espiras.

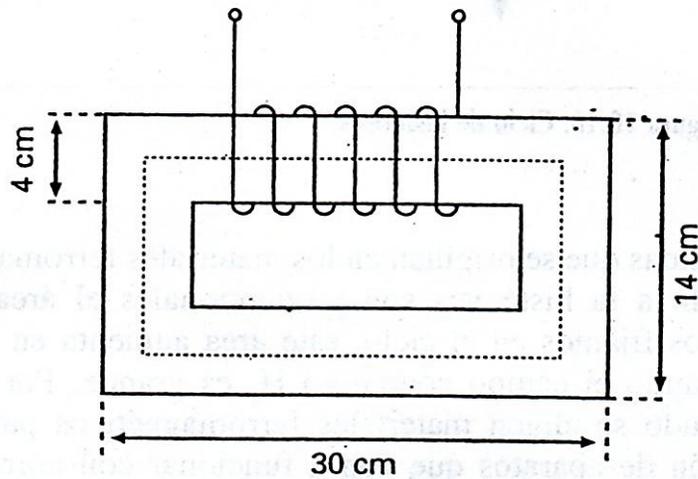


Figura. 1.7.1.

Solución: consultando la tabla (1.5.1), tenemos que para conseguir una inducción de 1,3 T en chapa al silicio se necesita una intensidad de campo igual a $H=1.300 \text{ Av}$.

Según se desprende de la figura (1.7.1), la longitud media de las líneas de campo, es:

$$L = 26 + 10 + 26 + 10 = 72 \text{ cm} = 0,72 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz necesaria será entonces:

$$\mathcal{F} = H \cdot L = 1.300 \cdot 0,72 = 936 \text{ Av}$$

La intensidad de la corriente:

$$I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{936}{750} = 1,25 \text{ A}$$

En el caso de que el circuito magnético este compuesto por diferentes partes, se suman las fuerzas magnetomotrices de cada una de las diferentes partes del circuito magnético.

Ejemplo. 1.7.2.

El circuito magnético de la figura (1.7.2), está fabricado con hierro forjado. Se desea obtener en el entrehierro (espacio sin hierro, donde las líneas de campo se tienen que establecer con gran dificultad por el aire) una inducción magnética de 0,9 T. Suponiendo que todo el flujo se conduce por dicho entrehierro y que no se dispersa, determinar la intensidad de corriente que habrá que proporcionar a la bobina de 500 espiras.

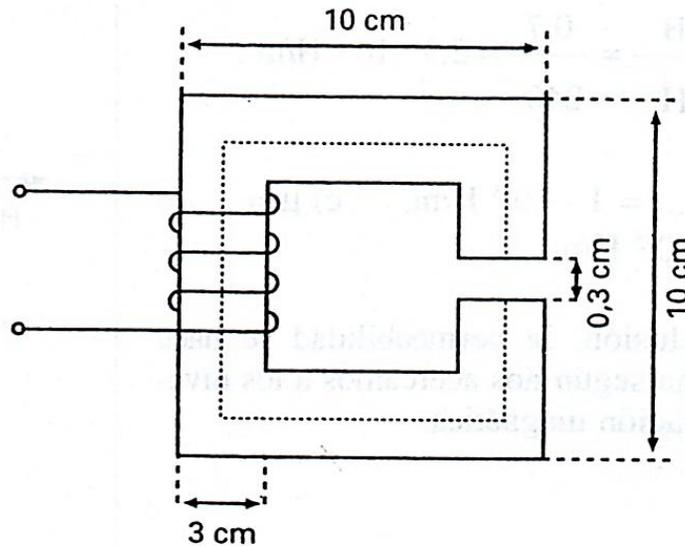


Figura. 1.7.2.

Solución: la intensidad de campo necesaria para conseguir una inducción de 0,9 T en la parte del circuito magnético formado por el hierro forjado es, según la tabla (1.5.1), de 400 Av./m.

La longitud media del circuito formado por hierro, es:

$$L_{Fe} = 7 + 7 + 7 + 6,7 = 27,7 \text{ cm} = 0,277 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz que necesita el hierro, es:

$$\mathcal{F}_{Fe} = H_{Fe} \cdot L_{FE} = 400 \cdot 0,277 = 111 \text{ Av}$$

La intensidad de campo en el aire o entrehierro la calculamos aplicando el concepto de permeabilidad y recordando que la permeabilidad del aire es $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$.

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0,9}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 716.197 \text{ Av/m}$$

Teniendo en cuenta que la longitud en el entrehierro es 0,3 cm (0,003 m), la fuerza magnetomotriz que necesita este tramo del circuito magnético es:

$$\mathcal{F}_{aire} = H \cdot L = 716.197 \cdot 0,003 = 2.149 \text{ Av}$$

La fuerza magnetomotriz necesaria para todo el circuito magnético será, por tanto:

$$\mathcal{F} = \mathcal{F}_{Fe} + \mathcal{F}_{aire} = 111 + 2.149 = 2.260 \text{ Av}$$

La intensidad de la bobina de 500 espiras, es:

$$I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{2.260}{500} = 4,52 \text{ A}$$

1.8. Electroimanes.

Un electroimán consiste en un núcleo de hierro rodeado de una bobina que se imanta a voluntad cuando hacemos pasar una corriente eléctrica, y se desimanta en el momento que interrumpimos esta corriente (figura 1.8.1).

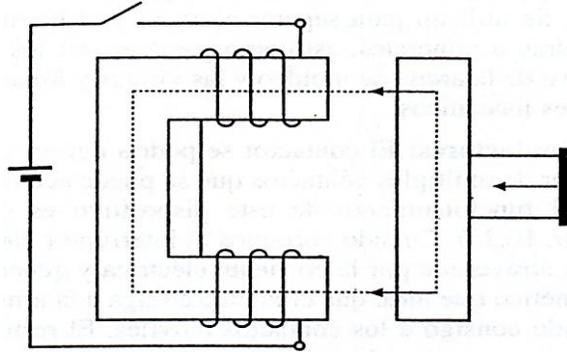


Figura. 1.8.1.

La fuerza con la que atrae un electroimán a una pieza de hierro móvil (armadura) a través del aire o entrehierro se puede calcular con la ayuda de la siguiente expresión:

$$F = 40.000 B^2 \cdot S$$

F = Fuerza de atracción en Kp^* .

B = Inducción en el núcleo en T.

S = Superficie de contacto entre el núcleo y el entrehierro móvil.

* Kp : El kilopondio o kilogramo-fuerza es la unidad de fuerza en el Sistema Técnico de Unidades.

Ejemplo. 1.8.1

Determinar la fuerza con la que atraerá el electroimán de la figura (1.8.2), a la armadura de hierro si la inducción que aparece es de 1,5 T.

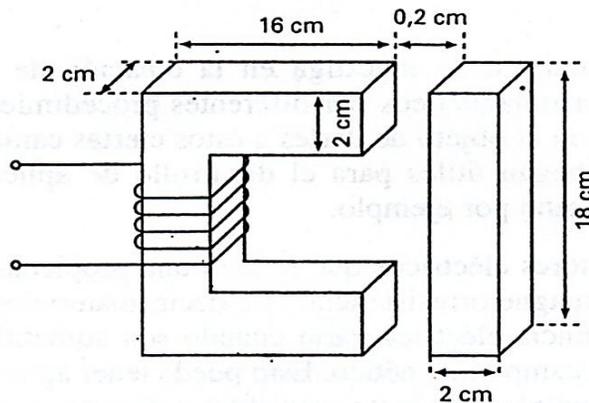


Figura. 1.8.2.

Solución la superficie de atracción de uno de los polos, es:

$$S = 2 \cdot 2 = 4 \text{ cm}^2$$

Como vamos a calcular la fuerza de atracción de los dos polos, la superficie será entonces:

$$S = 2 \cdot 4 = 8 \text{ cm}^2 = 0.0008 \text{ m}^2$$

La fuerza de atracción del electroimán, es:

$$F = 40.000 \cdot B^2 \cdot S = 40.000 \cdot 1.5^2 \cdot 0.0008 = 72 \text{ Kp}$$

Ejemplo 1.8.2. Se desea conseguir que el electroimán de la figura (1.8.2), desarrolle una fuerza de atracción de 2.88 Kp. Teniendo en cuenta que el núcleo está fabricado con hierro forjado y que la bobina posee 344 espiras, calcular la intensidad de corriente eléctrica para conseguirlo.

Solución: Determinaremos primero la inducción magnética que se tiene que dar en el entrehierro:

$$F = 40.000 \cdot B^2 \cdot S, \text{ despejando:}$$

$$B = \sqrt{\frac{F}{40.000 \cdot S}} = \sqrt{\frac{2.88}{40.000 \cdot 0,0008}} = 0,3 \text{ T}$$

Consultando en la tabla (1.5.1), tenemos que para conseguir 0,3 T en chapa normal necesitamos aplicar una intensidad de campo igual a 120 Av/m.

La longitud media del núcleo de chapa es:

$$L = 16 + 16 + 16 + 16 = 64 \text{ cm} = 0,64 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz para chapa es:

$$\mathcal{F} = H \cdot L = 120 \cdot 0,64 = 77 \text{ Av}$$

La intensidad de campo en el aire es:

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0,3}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 238,732 \text{ Av/m}$$

La longitud media del entrehierro es:

$$L = 0,2 + 0,2 = 0,4 \text{ cm} = 0,004 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz para el entrehierro es:

$$\mathcal{F} = H \cdot L = 238.732 \cdot 0,004 = 955 \text{ Av}$$

La fuerza magnetomotriz para todo el circuito es:

$$\mathcal{F} = 77 + 955 = 1.032 \text{ Av}$$

Dado que la bobina es de 344 espiras, la intensidad con la que habrá que alimentarla es:

$$I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{1.032}{344} = 3 \text{ A}$$

Aplicaciones prácticas de los electroimanes.

Según como se disponga el núcleo de los electroimanes, estos pueden ser de culata (figura 1.8.3) o de núcleo móvil (figura 1.8.4). En los electroimanes el núcleo suele ser de un material ferromagnético con un bajo campo coercitivo, de tal forma, que solo se imanta cuando las bobinas están siendo recorridas por una corriente eléctrica. En los dos tipos de electroimanes la parte móvil es atraída hacia el núcleo mientras alimentamos a la bobina con corriente eléctrica.

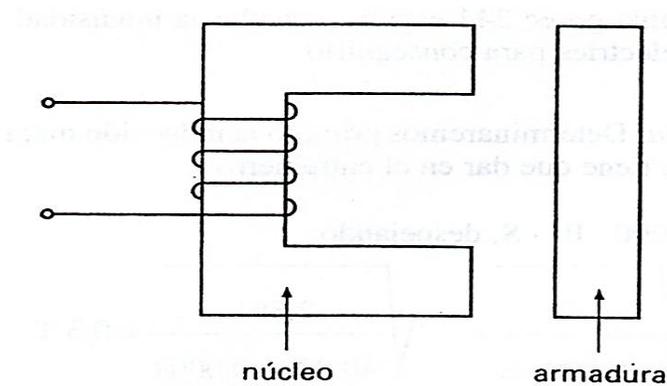


Figura. 1.8.3. Electroimán de culata.

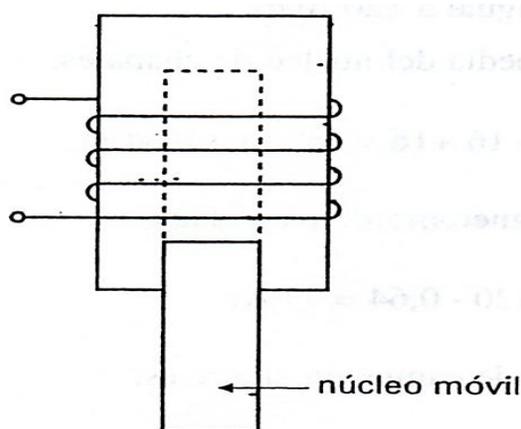


Figura. 1.8.4. Electroimán de núcleo móvil.

Las aplicaciones de los electroimanes son muy variadas. Seguidamente, exponemos algunas de las más relevantes:

Frenos magnéticos: Se aplican sobre todo en ascensores, montacargas y grúas. Las zapatas de frenado se abren mediante un electroimán cuando existe una situación normal, es decir, cuando hay tensión en la red. Si por causa de una avería desaparece el suministro de energía eléctrica, las zapatas se cierran sobre la superficie de un tambor, con lo que frenan el sistema e impiden la caída al vacío de la carga.

Electroválvulas: La válvula abre o cierra el circuito hidráulico o neumático según sea o no alimentada la bobina del electroimán que lleva incorporado. La aplicación de las electroválvulas está muy extendida en todo tipo de aplicaciones industriales, donde la automatización de los fluidos tiene una gran importancia.

Por ejemplo, las lavadoras automáticas tienen una electroválvula para abrir el circuito de admisión de agua.

Timbres: Los timbres se utilizan para producir señales acústicas.

Sistemas que separan los materiales magnéticos de los no magnéticos: Se utilizan para separar el acero y el hierro del carbón, piedras o minerales, así como para separar los residuos de acero de la arena de moldeo y las virutas y limaduras de los talleres mecánicos.

Relés y contactores: El contactor se podrá definir como un interruptor de múltiples contactos que se pueden accionar a distancia. El funcionamiento de este dispositivo es como sigue (figura 1.8.5). Cuando cerramos el interruptor simple, la bobina es atravesada por la corriente eléctrica y genera un campo magnético que hace que el núcleo atraiga a la armadura, arrastrando consigo a los contactos móviles. El resultado es que estos contactos cambian de posición y se cierran.

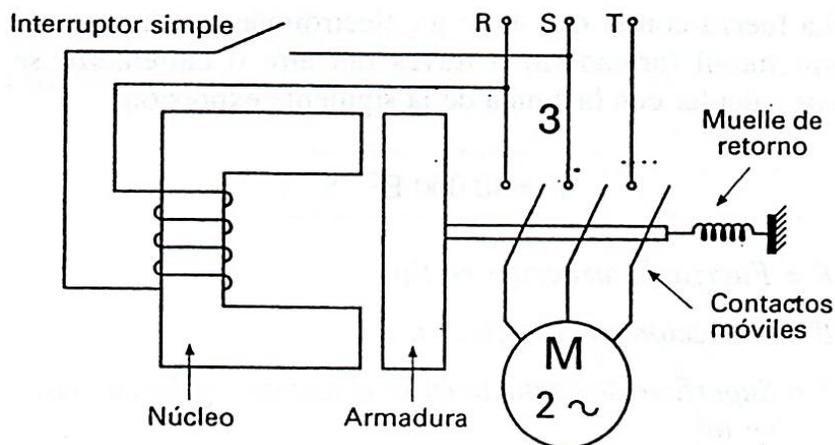


Figura. 1.8.5. Contactor accionando un motor eléctrico trifásico.

La corriente eléctrica que necesita la bobina para crear el campo magnético necesario para que la armadura atraiga hacia sí al núcleo es muy pequeña en relación a la corriente que va a circular por los contactos principales que alimentan al motor.

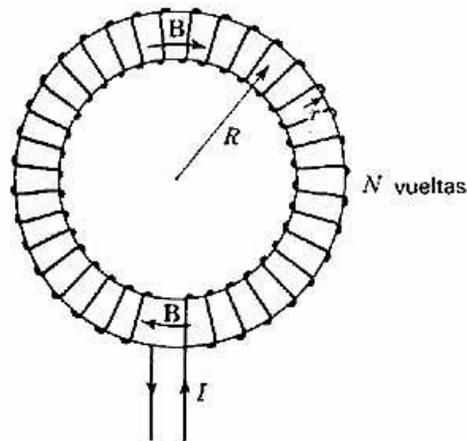
En la actualidad se investiga en la creación de nuevos materiales ferromagnéticos por diferentes procedimientos de laboratorio con el objeto de darles a estos ciertas características que los hagan útiles para el desarrollo de aplicaciones especiales, como por ejemplo:

- Conductores eléctricos que poseen una propiedad conocida como “magnetorresistencia”. Es decir, materiales en los que la resistencia eléctrica varía cuando son sometidos a la acción de un campo magnético. Esto puede tener aplicaciones como, por ejemplo, elementos sensibles o detectores de campos magnéticos, detectores de proximidad magnéticos, etc.
- Etiquetado magnético para evitar el robo de artículos en grandes almacenes.

1.9. Ejercicios:

1.1. Un toroide de acero fundido de una sección transversal uniforme de 8 cm^2 tiene una circunferencia media de 0.6 m . La bobina de excitación es embobinada uniformemente alrededor del toroide y tiene 300 vueltas. Encuentre el flujo en webers cuando la corriente directa en la bobina de excitación es a) 1 amp . b) 2 amp . c) 4 amp . ¿Cuándo la corriente se duplica, el flujo también se duplica? Explíquelo.

Encuentre el valor de la corriente directa que deberá circular en la bobina de excitación, para establecer en el toroide un flujo de $(8) (10^{-4})$ weber.



Problema 1.1.

Datos:

Material: acero fundido.

$$A = 8 \text{ cm}^2 = 8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\ell = 0.6 \text{ m}.$$

$$N = 300_e$$

$$\text{a) } FMM = N \cdot I = 300_e \cdot 1A = 300 \text{ A} \cdot e$$

$$H = \frac{FMM}{\ell} = \frac{300 \text{ A} \cdot e}{0.6 \text{ m}} = 500 \frac{\text{A} \cdot e}{\text{m}}; \beta = 0.82 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

$$\Phi_a = \left(0.82 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}\right) (8 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = 65.6 \times 10^{-5} \text{ Wb}$$

$$\text{b) } FMM = N \cdot I = 300_e \cdot 2A = 600 \text{ A} \cdot e$$

$$H = \frac{FMM}{\ell} = \frac{600 \text{ A} \cdot e}{0.6 \text{ m}} = 1000 \frac{\text{A} \cdot e}{\text{m}}; \beta = 1.15 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

$$\Phi_b = \left(1.15 \frac{Wb}{m^2}\right) (8 \times 10^{-4} m^2) = 92 \times 10^{-5} Wb$$

$$c) FMM = N \cdot I = 300_e \cdot 4A = 1200 A \cdot e$$

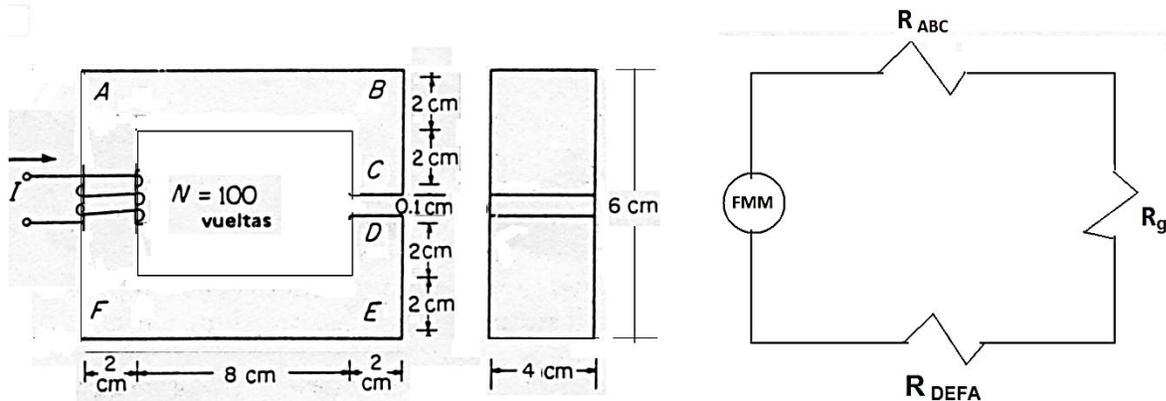
$$H = \frac{FMM}{\ell} = \frac{1200 A \cdot e}{0.6 m} = 2000 \frac{A \cdot e}{m}; \quad \beta = 142 \frac{Wb}{m^2}$$

$$\Phi_c = \left(142 \frac{Wb}{m^2}\right) (8 \times 10^{-4} m^2) = 113.6 \times 10^{-5} Wb$$

$$d) \Phi = 8 \times 10^{-4} Wb; \quad \beta = \frac{8 \times 10^{-4} Wb}{8 \times 10^{-4} m^2} = 1 Wb; \quad H = 700 \frac{A \cdot e}{m}$$

$$FMM = H \cdot \ell = \left(700 \frac{A \cdot e}{m}\right) (0.6) = 420 A \cdot e; \quad I = \frac{FMM}{N} = \frac{420 A \cdot e}{300_e} = 1.4 A$$

1.2. Encuentre la corriente directa en amperes necesaria para establecer $(7.6) (10^{-4})$ weber en la estructura magnética mostrada en la figura. El núcleo está construido con hojas de acero laminado con un factor de apilamiento de 0.95.



Problema 1.2.

Datos:

$$\ell = (10 \times 2) + 4(2) = 28 \text{ cm} = 0.28 \text{ m}$$

$$A = (2 \times 4) \times 0.95 \times 10^{-4} m^2 = 7.6 \times 10^{-4} m^2$$

$$\Phi = 7.6 \times 10^{-4} Wb$$

$$\beta = \frac{7.6 \times 10^{-4}}{7.6 \times 10^{-4}} = 1 \frac{Wb}{m^2}; \quad H = 200 \frac{A \cdot e}{m}$$

$$I = \frac{H \times \ell}{N} = \frac{\left(200 \frac{A \cdot e}{m}\right) (0.28 \text{ m})}{100_e} = 0.56 A.$$

1.3. ¿A qué valor deberá ser incrementada la corriente en el problema 1.2 si un entrehierro de 0.1 cm. es intercalado en el núcleo? Considere en el entrehierro el efecto marginal, pero desprecie los flujos de dispersión.

Solución:

$$\ell_{ABC} = 11.95 \text{ cm}; \ell_g = 0.1 \text{ cm}; \ell_{DEFA} = 15.95 \text{ cm}$$

$$A_{ABC} = A_{DEF} = 2 \times 4 \times 0.95 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 7.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_g = (2 + 0.1)(4 + 0.1) \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 8.61 \times 10^{-4} \text{ m}^2; A_g = (w + \ell_g)(T + \ell_g)$$

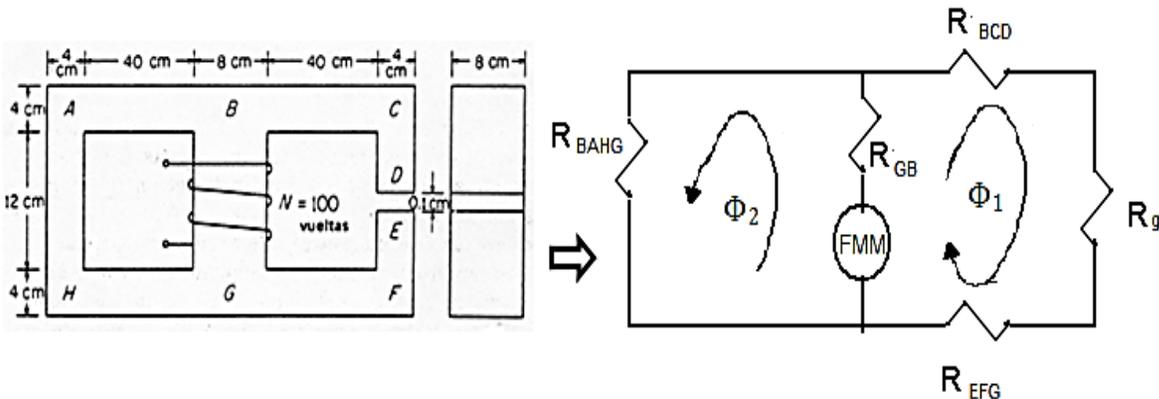
$$\beta_{ABC} = \beta_{DEF} = \frac{7.6 \times 10^{-4}}{7.6 \times 10^{-4}} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}; H_{ABC} = H_{DFE} = 200 \frac{\text{A} \cdot \text{e}}{\text{m}}$$

$$\beta_g = \frac{7.6 \times 10^{-4}}{8.61 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 0.883 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}; H_g = \frac{\beta_g}{4\pi \times 10^{-7}} = \frac{0.883}{4\pi \times 10^{-7}} = 702426 \frac{\text{A} \cdot \text{e}}{\text{m}}$$

$$\text{FMM} = [200(11.95 + 15.95) \times 10^{-2}] + [702426 \times 0.1 \times 10^{-2}] = 758.226 \text{ A} \cdot \text{e}$$

$$I = \frac{758.226 \text{ A} \cdot \text{e}}{100e} = 7.58 \text{ A}$$

1.4. En la estructura magnética mostrada en la figura que se acompaña, la densidad de flujo en el entrehierro es 0.8 weber/m². El núcleo está hecho de hojas de acero laminado con un factor de apilamiento de 0.9. Encuentre la fmm. Y la corriente de la bobina de excitación. Considere en el entrehierro el efecto marginal, pero desprecie los flujos de dispersión.



Problema 1.4.

Solución: Malla I

$$\beta_g = 0.8 \text{ Wb/m}^2$$

$$A_g = (4 + 0.1)(8 + 0.1) = 33.21 \text{ cm}^2 = 33.21 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{BCD} = A_{EFG} = A_{BAHG} = 4 \times 8 \times 0.9 = 28.8 \text{ cm}^2 = 28.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{BG} = 8 \times 8 \times 0.9 = 57.6 \text{ cm}^2 = 57.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\ell_{BCD} = \ell_{EFG} = 53.95 \text{ cm} = 0.5395 \text{ m}$$

$$\ell_{BAHG} = 108 \text{ cm} = 1.08 \text{ m}$$

$$\ell_{BG} = 16 \text{ cm} = 0.16 \text{ m}$$

$$\Phi_g = \Phi_1 = \left(0.8 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}\right) (33.21 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = 26.568 \times 10^{-4} \text{ Wb};$$

$$H_g = \frac{0.8}{4\pi \times 10^{-7}} = 636619.77 \frac{\text{A} \cdot \text{e}}{\text{m}}$$

$$\beta_{BCD} = \beta_{EFG} = \frac{26.568 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{28.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 0.9225 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}; H_{BCD} = H_{EFG} = 140 \frac{\text{A} \cdot \text{e}}{\text{m}}$$

Malla II

$$FMM = H_{GB} \cdot \ell_{GB} + H_{BCD} \cdot \ell_{BCD} + H_g \cdot \ell_g + H_{EFG} \cdot \ell_{EFG}$$

Malla I

$$FMM = H_{GB} \cdot \ell_{GB} + H_{BAHG} \cdot \ell_{BAHG}$$

$$\cancel{H_{GB} \cdot \ell_{GB}} + H_{BCD} \cdot \ell_{BCD} + H_g \cdot \ell_g + H_{EFG} \cdot \ell_{EFG} = \cancel{H_{GB} \cdot \ell_{GB}} + H_{BAHG} \cdot \ell_{BAHG}$$

$$H_{BAHG} = \frac{\left(140 \frac{\text{A} \cdot \text{e}}{\text{m}}\right) (0.5395) + \left(636619.77 \frac{\text{A} \cdot \text{e}}{\text{m}}\right) (0.001 \text{ m}) + \left(140 \frac{\text{A} \cdot \text{e}}{\text{m}}\right) (0.5395 \text{ m})}{1.08}$$

$$H_{BAHG} = 729.33 \frac{\text{A} \cdot \text{e}}{\text{m}}; \quad \beta_{BAHG} = 1.35 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$$

$$\Phi_{BAHG} = \Phi_2 = \left(1.35 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}\right) (28.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = 3.888 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

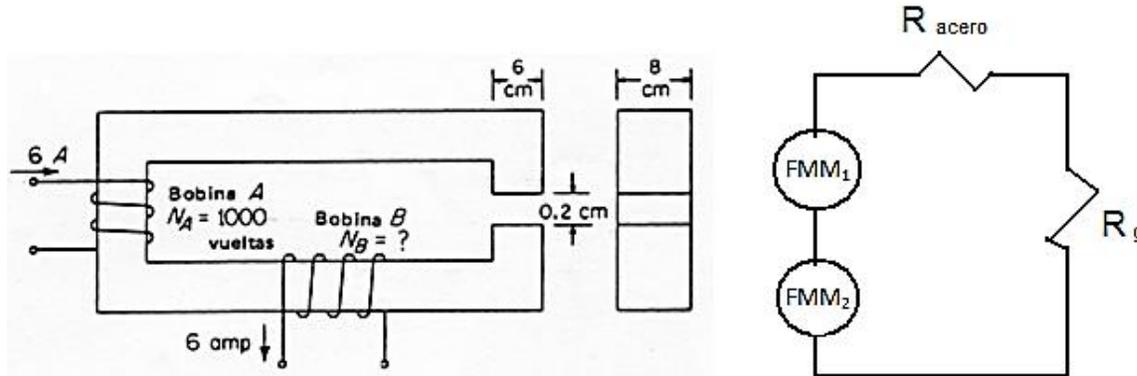
$$\Phi_{GB} = \Phi_1 + \Phi_2 = 6.5448 \times 10^{-3} \text{ Wb}; \quad \beta_{GB} = \frac{6.54 \times 10^{-3}}{57.6 \times 10^{-4}} = 1.136 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}; \quad H_{BG} = 240 \frac{\text{A} \cdot \text{e}}{\text{m}}$$

$$FMM = \left(240 \frac{\text{A} \cdot \text{e}}{\text{m}}\right) (0.16) + \left(729.33 \frac{\text{A} \cdot \text{e}}{\text{m}}\right) (1.08) = 8.26.076 \text{ A} \cdot \text{e}$$

$$I = \frac{826.076 \text{ A} \cdot \text{e}}{100 \text{ e}} = 8.26 \text{ A}$$

1.5. La estructura magnética mostrada en la figura, está hecha de hojas de acero laminado. El factor de apilamiento es de 0.9. La longitud media de la trayectoria magnética es 0.75 m. en la porción de acero. Las medidas de la sección transversal son 6 cm. X 8 cm. La longitud del entrehierro es 0.2 cm. El flujo en el entrehierro es (4) (10^{-3}) weber. La bobina A tiene 1000 vueltas y por ambas bobinas circulan 6 amp. Determine el número de

vueltas de la bobina B. desprecie los flujos de dispersión, pero considere los efectos marginales.



Problema 1.5.

$$\ell_{ACERO} = 0.75; \quad \ell_g = 0.2 \text{ cm} = 0.002 \text{ m}$$

$$A_{ACERO} = 6 \times 8 \times 0.9 = 43.2 \text{ cm}^2 = 43.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\Phi = 4 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$\beta_{ACERO} = \frac{4 \times 10^{-3} \text{ Wb}}{43.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 0.926 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}; \quad H_{ACERO} = 145 \frac{\text{A} \cdot e}{\text{m}}$$

$$\beta_g = \frac{4 \times 10^{-3} \text{ Wb}}{5.084 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 0.787 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}; \quad H_g = \frac{0.787}{4\pi \times 10^{-7}} = 626101.271 \frac{\text{A} \cdot e}{\text{m}}$$

$$FMM_1 = (1000 e)(6 A) = 6000 \text{ A} \cdot e$$

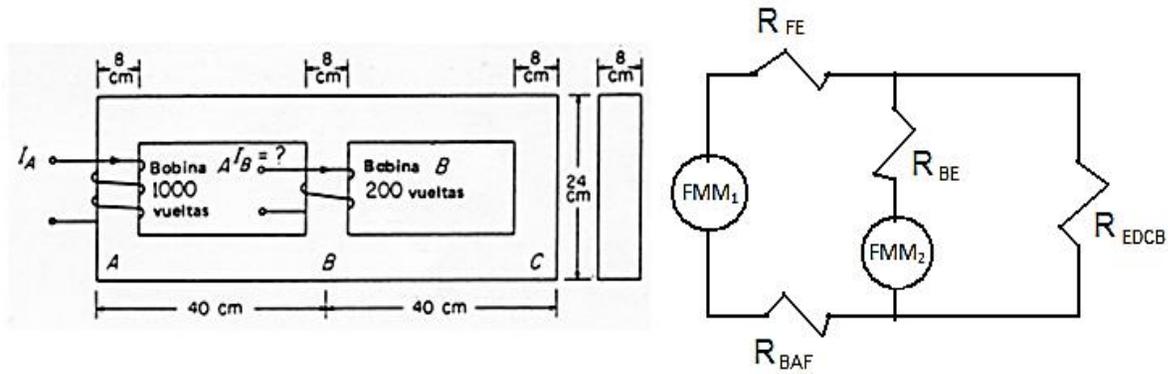
$$FMM_1 + FMM_2 = H_{ACERO} \cdot \ell_{ACERO} + H_g \cdot \ell_g$$

$$6000 \text{ A} \cdot e + FMM_2 = \left(145 \frac{\text{A} \cdot e}{\text{m}}\right)(0.75) + \left(626101.271 \frac{\text{A} \cdot e}{\text{m}}\right)(0.002 \text{ m})$$

$$FMM_2 = 1360.9525 \text{ A} \cdot e - 6000 \text{ A} \cdot e = -4639.047 \text{ A} \cdot e$$

$$N_B = \frac{-4639.047 \text{ A} \cdot e}{-6 A} = 773.17 e \quad \Rightarrow \quad N_B = 773 \text{ espiras.}$$

1.6. El núcleo magnético de acero fundido mostrado en la figura tiene una sección transversal uniforme de 8 cm. X 8 cm. Tiene dos bobinas de excitación, una en el brazo A y la otra en el brazo B. La bobina A tiene 1000 vueltas y circula a través de ella una corriente de 0.5 amp. En la dirección mostrada. Determine la corriente que debe circular en la bobina B en la dirección mostrada, con objeto de que en el brazo central se tenga flujo nulo. La bobina B tiene 200 vueltas.



Problema 1.6.

Solución:

$$A = 8 \times 8 = 64 \text{ cm}^2 = 64 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$I_A = 0.5 \text{ A}; \quad N_A = 1000 \text{ e}; \quad FMM_1 = (0.5 \text{ A})(1000 \text{ e}) = 500 \text{ A} \cdot \text{e}$$

$$FMM_1 - FMM_2 = H_{FE} \cdot \ell_{FE} + H_{BE} \cdot \ell_{BE} + H_{BAF} \cdot \ell_{BAF}$$

$$H_{FE} = H_{BAF} = H_{EDCB} = H$$

Malla externa:

$$FMM_1 = H_{FE} \cdot \ell_{FE} + H_{EDCB} \cdot \ell_{EDCB} + H_{BAF} \cdot \ell_{BAF}$$

$$FMM_1 = H(\ell_{FE} + \ell_{EDCB} + \ell_{BAF})$$

$$H = \frac{500 \text{ A} \cdot \text{e}}{(0.36 + 0.88 + 0.52) \text{ m}} = 284.09 \frac{\text{A} \cdot \text{e}}{\text{m}}; \quad \beta = 0.5 \frac{\text{WB}}{\text{m}^2}$$

$$\Phi = \left(0.5 \frac{\text{WB}}{\text{m}^2}\right) (64 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = 32 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

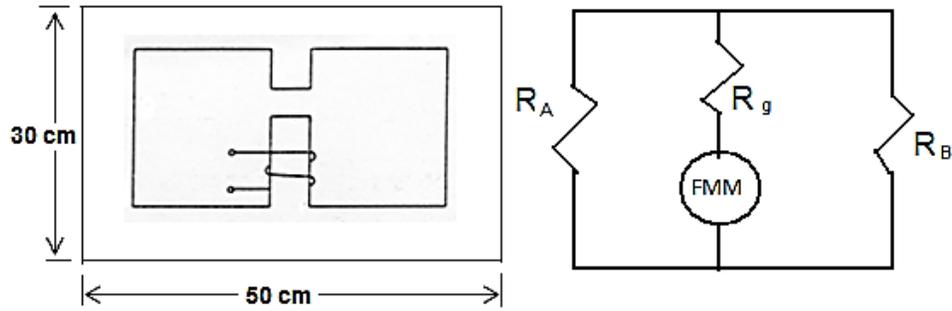
Malla II

$$-FMM_2 = H_{BE} \cdot \ell_{BE} + H_{EDCB} \cdot \ell_{EDCB}$$

$$-FMM_2 = 0 + \left(284.09 \frac{\text{A} \cdot \text{e}}{\text{m}}\right) (0.88) = 250 \text{ A} \cdot \text{e}$$

$$I_2 = \frac{-250 \text{ A} \cdot \text{e}}{200 \text{ e}} = -1.25 \text{ A}$$

1.7. En la estructura magnética mostrada en la figura que se acompaña, el material usado es acero laminado. Las dos ramas laterales son simétricas. La sección transversal de la estructura de un valor de 5 cm. X 5 cm. Es uniforme. La fmm. De la bobina es 2000 amp.-vueltas, y la longitud del entrehierro es 0.2 cm. Determine el flujo en el entrehierro. Desprecie flujos de dispersión pero considere el efecto marginal en el entrehierro.



Problema 1.7.

$$\ell_B = \ell_A = (45 + 25 + 25 - 0.2) = 94.8 \text{ cm} = 0.48 \text{ m}$$

$$\ell_g = 0.2 \text{ cm} = 0.002 \text{ m}$$

$$FMM = 2000 \text{ A} \cdot e$$

$$A_A = 5 \times 5 = 25 \text{ cm}^2 = 25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_g = (5 + 0.2)(5 + 0.2) = 27.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$FMM = H_A \cdot \ell_A + H_g \cdot \ell_g$$

Suponiendo: $FMM = H_A \cdot \ell_A$; $H_A = \frac{2000 \text{ A} \cdot e}{0.948 \text{ m}} = 2109.705 \frac{\text{A} \cdot e}{\text{m}}$ $\beta_A = 1.45 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$

$$\Phi_g = 1.45 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \times 25 \times 10^{-4} = 3.625 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

Suponiendo: $FMM = H_g \cdot \ell_g$; $H_g = \frac{2000 \text{ A} \cdot e}{0.002 \text{ m}} = 1 \times 10^6 \frac{\text{A} \cdot e}{\text{m}}$; $\beta_g = H_g (4\pi \times 10^{-7}) = 1.257 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$

$$\Phi_A = \left(1.257 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \times 27.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \right) = 3.398 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

Flujo supuesto en Wb	Partes de acero			Entrehierro		FMM _g	FMM total
	$\beta_{A, B}$	$H_A \ H_B$	$FMM_{A, B}$	β_g	H_g		
	$\left[\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \right]$	$\left[\frac{\text{A} \cdot e}{\text{m}} \right]$	$[\text{A} \cdot e]$	$\left[\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \right]$	$\left[\frac{\text{A} \cdot e}{\text{m}} \right]$	$[\text{A} \cdot e]$	$[\text{A} \cdot e]$
3.171×10^{-3}	0.634	80	75.84	1.173	933210.7	1866.42	1942.26
3.22×10^{-3}	0.644	82	77.74	1.191	947631.1	1895.26	1973.00
3.25×10^{-3}	0.65	83	78.68	1.202	956459.99	1912.92	1991.60

$$\Phi_g = 3.25 \times 10^{-3} \text{ Wb.}$$

1.8. En el núcleo magnético mostrado en la figura, calcule la corriente en amperes necesaria para establecer un flujo de 7×10^{-3} weber en el brazo central B. Resuélvalo por métodos: a) de prueba y error y b) grafico, usando curvas compuestas.

Longitud media de la trayectoria; $bafe = 72 \text{ cm}; be = 30 \text{ cm}; bcde = 80 \text{ cm}.$

Longitud del entrehierro: $0.1 \text{ cm}.$

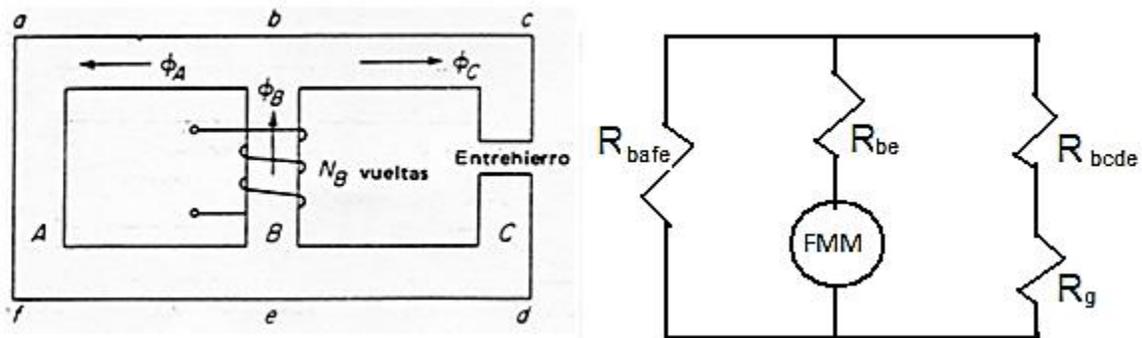
Área de la sección transversal; $bafe = 40 \text{ cm}^2; be = 60 \text{ cm}^2; bcde = 40 \text{ cm}^2.$

Numero de vueltas de la bobina

de excitación: $N_B = 1000 \text{ vueltas}.$

Material = acero para transformadores de la USS.

Desprecie los efectos marginales y de dispersión en el entrehierro.



Problema 1.8.

$$A_g = 40 \times 10^{-4} \text{ m}^2; \quad A_{bcde} = 40 \times 10^{-4} \text{ m}^2; \quad A_{bafe} = 40 \times 10^{-4} \text{ m}^2; \quad A_{be} = 60 \times 10^{-4}$$

$$\beta_{be} = \frac{7 \times 10^{-3} \text{ Wb}}{6 \times 10^{-3}} = 1.17 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}; \quad H_{be} = 375 \frac{\text{A} \cdot \text{e}}{\text{m}}; \quad FMM_{be} = \left(375 \frac{\text{A} \cdot \text{e}}{\text{m}} \right) (0.3 \text{ m}) = 112.5 \text{ A} \cdot \text{e}$$

Malla I

$$FMM = H_{bc} \cdot \ell_{bc} + H_{bafe} \cdot \ell_{bafe}$$

$$FMM_A = FMM_C$$

$$\underbrace{H_{bafe} \cdot \ell_{bafe}}_{\Phi_A} = \underbrace{H_{bcde} \cdot \ell_{bcde} + H_g \cdot \ell_g}_{\Phi_C}$$

Malla II

$$FMM = H_{be} \cdot \ell_{be} + H_{bcde} \cdot \ell_{bcde} + H_g \cdot \ell_g$$

$$\Phi_{max} = 7 \times 10^{-3} \text{ Wb} = \Phi_A + \Phi_C$$

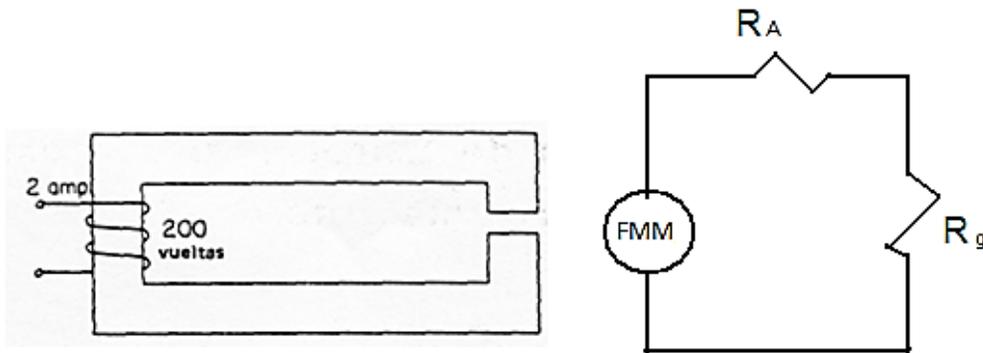
Φ_A supuesto	β bafe	H bafe	FMM_A $H \cdot \ell$ bafe	Φ_C supuesto	β_{bcde}	H bcde	$H \cdot \ell$ bcde	β_g	H_g	$H_g \ell_g$	FMM_C
3.5×10^{-3}	0.875	140	100.8	3.5×10^{-3}	0.875	140	112	0.875	696302.9	696.3	808.3
4.5×10^{-3}	1.125	245	176.4	2.5×10^{-3}	0.625	90	72	0.625	497359.2	497.4	569.4
5×10^{-3}	1.25	475	342	2×10^{-3}	0.5	70	56	0.5	397887.4	397.9	467.9
5.2×10^{-3}	1.30	500	360	1.8×10^{-3}	0.45	65	52	0.45	358098.6	358.1	410.1
5.4×10^{-3}	1.35	750	540	1.6×10^{-3}	0.40	58	46.4	0.40	318309.8	318.3	369.7
5.3×10^{-3}	1.325	625	450	1.7×10^{-3}	0.425	60	48	0.425	338204.3	338.2	386.6
5.25×10^{-3}	1.313	520	374.4	1.75×10^{-3}	0.438	61	48.8	0.438	348151.4	348.1	396.9

$$FMM_A \approx FMM_C \approx 380 \text{ A} \cdot e$$

$$FMM_T = (112.5 + 380) = 492.5 \text{ A} \cdot e$$

$$I = \frac{492.5 \text{ A} \cdot e}{1000 e} = 0.493 \text{ A}$$

1.9. El núcleo magnético mostrado en la figura que se acompaña está hecho de hojas de acero laminado con un factor de apilamiento de 0.9. La bobina de excitación tiene 200 vueltas y circula a través de ella una corriente de 2 amp. Determine el flujo en el entrehierro. Desprecie los flujos de dispersión, pero considere los efectos marginales en el entrehierro. La longitud media de la trayectoria magnética en el acero es de 80 cm, y la longitud del entrehierro es 0.1 cm. La sección transversal del núcleo es uniforme y es de 5 cm. X 5 cm. Resuelva este problema por a) método de prueba y error y b) método gráfico y compare resultados.



Problema 1.9.

$$FMM = (2 \text{ A})(200 e) = 400 \text{ A} \cdot e;$$

$$A_A = 5 \times 5 \times 0.9 = 22.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2;$$

$$A_g = (5.1)(5.1) = 26.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Suponiendo que toda la FMM está en el acero.

$$FMM = H_A \cdot \ell_A; \quad H_A = \frac{400 A \cdot e}{0.8 m} = 500 \frac{A \cdot e}{m}; \quad \beta_A = 0.85 \frac{Wb}{m}; \quad \Phi = 1.9 \times 10^{-3} Wb$$

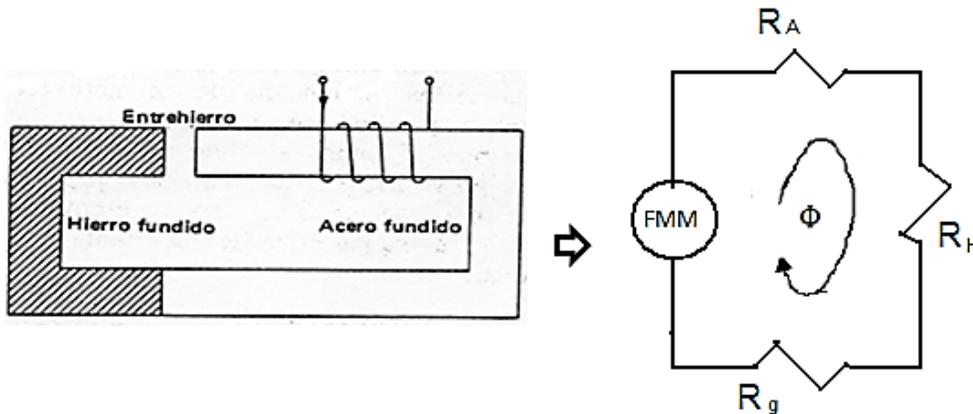
Suponiendo que toda la FMM está en el entrehierro.

$$FMM = H_g \cdot \ell_g; \quad H_g = \frac{400 A \cdot e}{0.001 m} = 400\,000 \frac{A \cdot e}{m}; \quad \beta_g = 0.503 \frac{Wb}{m}; \quad \Phi = 1.31 \times 10^{-4} Wb$$

Flujo supuesto	Acero			Entrehierro			
	β_A	H_A	$H_A \cdot \ell_A$	β_g	H_g	$H_g \cdot \ell_g$	FMM_T
$\Phi [Wb]$	$\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$	$\left[\frac{A \cdot e}{m}\right]$	$[A \cdot e]$	$\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$	$\left[\frac{A \cdot e}{m}\right]$	$[A \cdot e]$	$[A \cdot e]$
1.2×10^{-3}	0.53	70	56	0.461	367139.4	367.14	423.14
1.15×10^{-3}	0.51	66	52.8	0.442	351841.95	351.84	404.64

$$\Phi = 1.49 \times 10^{-3} Wb.$$

1.10. El núcleo magnético mostrado en la figura consiste de tres secciones hechas respectivamente de acero fundido, hierro fundido y un entrehierro. Encuentre el flujo en el entrehierro si los amp.-vueltas de la bobina de excitación son 800. El área de la sección transversal es uniforme de 8 cm. X 8 cm. La longitud media de las trayectorias magnéticas son: en el hierro fundido, 40 cm. En el acero fundido, 50 cm. La longitud del entrehierro es 0.1 cm. Desprecie los efectos marginales y de dispersión. (Sugerencia: construya las curvas compuestas de flujo vs. Fmm. Y resuélvalo por el método gráfico).



Problema 1.10.

$$FMM = 800 A \cdot e$$

$$A_A = A_H = A_g = 8 \times 8 = 64 \times 10^{-4} m^2; \quad \ell_H = 0.4 m; \quad \ell_A = 0.5 m; \quad \ell_g = 0.001 m$$

$$\text{Suponiendo } FMM = H_A \cdot \ell_A$$

$$H_A = \frac{800 A \cdot e}{0.5 m} = 1600 \frac{A \cdot e}{m}; \quad \beta_A = 1.35 \frac{Wb}{m^2}; \quad \Phi = 8.64 \times 10^{-3} Wb$$

$$\text{Suponiendo } FMM = H_H \cdot \ell_H$$

$$H_H = \frac{800 A \cdot e}{0.4} = 2000 \frac{A \cdot e}{m}; \quad \beta_H = 0.56 \frac{Wb}{m^2}; \quad \Phi = 3.584 \times 10^{-3} Wb$$

$$\text{Suponiendo } FMM = H_g \cdot \ell_g$$

$$H_g = \frac{800 A \cdot e}{0.001} = 800\,000 \frac{A \cdot e}{m}; \quad \beta_g = 1.005 \frac{Wb}{m^2}; \quad \Phi = 6.43 \times 10^{-3} Wb$$

$$\Phi_{MAX} = 3.584 \times 10^{-3} Wb.$$

Flujo supuesto	Acero fundido			Hierro fundido						
	β_A	H_A	$H_A \cdot \ell_A$	β_H	H_H	$H_H \cdot \ell_H$	β_g	H_g	$H_g \cdot \ell_g$	FMM_T
$\Phi [Wb]$	$\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$	$\left[\frac{A \cdot e}{m}\right]$	$[A \cdot e]$	$\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$	$\left[\frac{A \cdot e}{m}\right]$	$[A \cdot e]$	$\left[\frac{Wb}{m^2}\right]$	$\left[\frac{A \cdot e}{m}\right]$	$[A \cdot e]$	$[A \cdot e]$
3×10^{-3}	0.47	250	125	0.47	1500	600	0.47	373019.4	373.0	1098
5×10^{-3}	0.39	200	100	0.39	1200	480	0.39	310849.5	310.8	890
4×10^{-3}	0.375	190	95	0.375	1000	400	0.375	298415.5	298.4	793.4

$$\Phi \approx 2.4 \times 10^{-3} Wb.$$

2.- TRANSFORMADORES.

2.1. ESTRUCTURA DEL TRANSFORMADOR:

Se denomina transformador, a un dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia. La potencia que ingresa al equipo, en el caso de un transformador ideal (esto es, sin pérdidas), es igual a la que se obtiene a la salida. Las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño, tamaño, etc.

El transformador es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, por medio de la acción de un campo magnético. Está constituido por dos o más bobinas de material conductor, aisladas entre sí eléctricamente por lo general enrolladas alrededor de un mismo núcleo de material ferromagnético. La única conexión entre las bobinas la constituye el flujo magnético común que se establece en el núcleo.

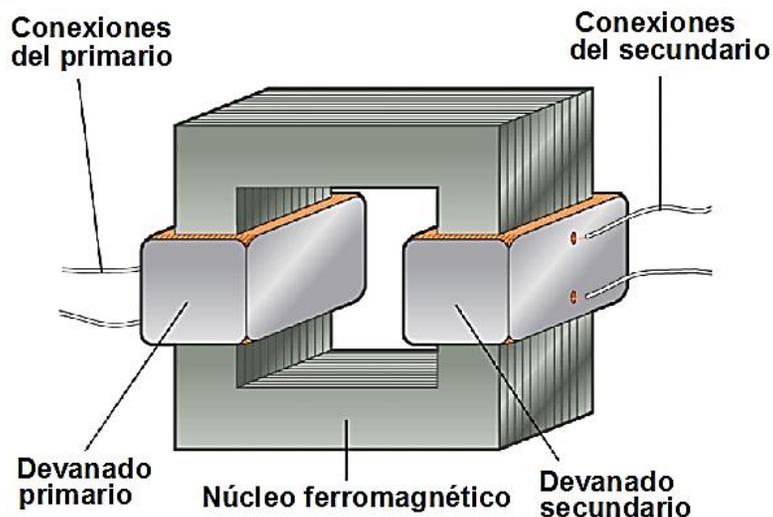


Figura. 2.1.1. Estructura del transformador eléctrico.

Un transformador posee dos bobinados, uno primario y uno secundario que se arrollan sobre un núcleo magnético común, formado por chapas magnéticas apiladas.

-Por el bobinado primario se conecta la tensión de entrada, y por el secundario obtendremos la tensión de salida.

-Los transformadores tienen el núcleo de hierro con forma de ventana y está constituido por numerosas chapas magnéticas de diferente espesor, apiladas unas encima de otras y aisladas entre sí mediante un barniz.

-Esta disposición reduce considerablemente las pérdidas que aparecen en el hierro por efecto de las corrientes parásitas.

-Para formar el paquete de chapas se utilizan tornillos o remaches, procurando que queden aislados de las chapas.

Máquinas eléctricas.

- Se trata adecuadamente las superficies exteriores del núcleo para evitar la corrosión.
- Los dos bobinados aparecen arrollados sobre un carrete que abraza la columna central del núcleo.
- El conductor que se utiliza para las bobinas suele ser de cobre aislado mediante un barniz.

2.2. FUNCIONAMIENTO:

Para poder comprender el funcionamiento de un transformador se examinará el de construcción más elemental.

Un circuito magnético simple, constituido por dos columnas y dos culatas, en el que han sido arrollados dos circuitos eléctricos:

- Uno, constituido por una bobina de N_1 espiras, es conectado a la fuente de corriente alterna y recibe el nombre de primario.
- Otro constituido por un bobinado de N_2 espiras, permite conectar a sus bornes un circuito eléctrico de utilización (la carga) y recibe el nombre de secundario.

Al alimentar el bobinado primario con una fuente de voltaje alterno, por él (el bobinado) circulará una corriente eléctrica alterna (I_1), que produce una fuerza magnetomotriz que causa que se establezca un flujo de líneas de fuerza alterno (Φ_1) en el circuito magnético del transformador.

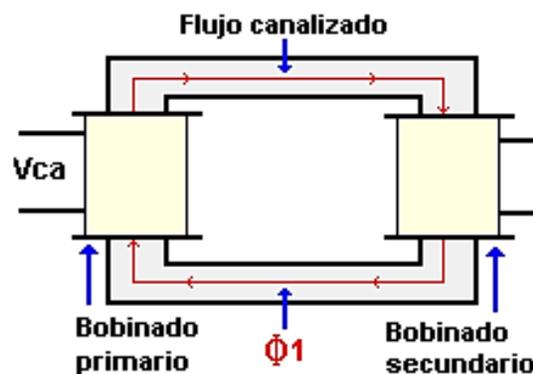
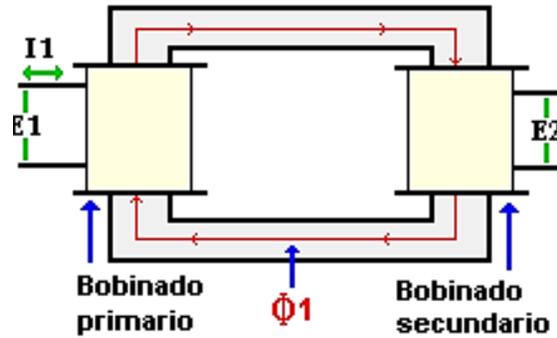


Figura. 2.2.1.

El flujo Φ_1 al estar canalizado en el núcleo, induce en las espiras del bobinado secundario una fuerza electromotriz (E_2).

Las espiras del bobinado primario también están en la influencia del Φ_1 . Por lo tanto en ellas se va a inducir una fuerza contraelectromotriz (E_1), que se opone al voltaje de alimentación, dando como resultado una disminución de la intensidad de corriente I_1



$$E1 = 4.44 \times \Phi \times F \times N1 \quad E2 = 4.44 \times \Phi \times F \times N2$$

Figura. 2.2.2.

Cuando se le aplica carga (R) al bobinado secundario, circula por él la intensidad de corriente I2, la cual produce el flujo magnético Φ_2 , opuesto al Φ_1 , por lo tanto reduce el flujo resultante en el núcleo dando como resultado que la fuerza contraelectromotriz disminuya y la intensidad de corriente I1 aumente.

Se observa como un aumento de la corriente en el secundario (I2) provoca un aumento de la corriente en el primario (I1), sin que exista conexión eléctrica entre ambos bobinados.

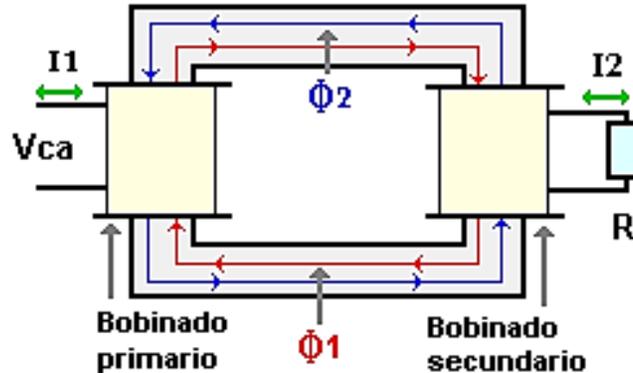


Figura. 2.2.3.

Dado que la fuerza contraelectromotriz es directamente proporcional al flujo inductor (Φ_1), al disminuir éste, por la contraposición del Φ_2 , se da un incremento en la corriente I1.

2.3. CIRCUITO EQUIVALENTE:

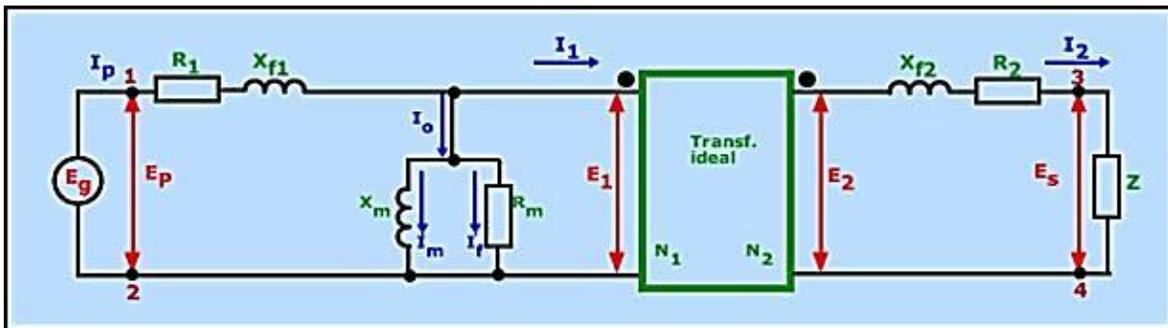


Figura. 2.3.1.

En este dibujo, como ya sabemos, representa un circuito con un transformador real con carga. Así que vamos a comenzar a simplificarlo. La intensidad I_p es muy superior a la intensidad I_0 , por lo tanto, podemos ignorar esta intensidad y la inductancia y la reactancia. Nos quedaría por tanto el siguiente circuito:

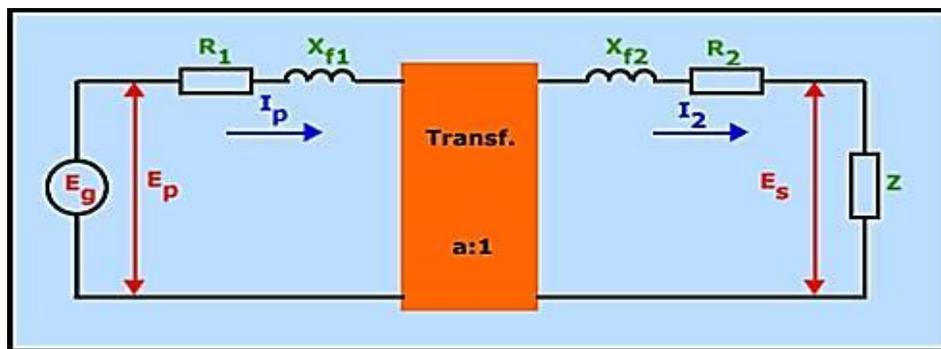


Figura. 2.3.2.

Posteriormente pasamos todos los componentes eléctricos a la izquierda del transformador, de esta forma podremos eliminar el transformador del dibujo, que nos quedaría de esta manera:

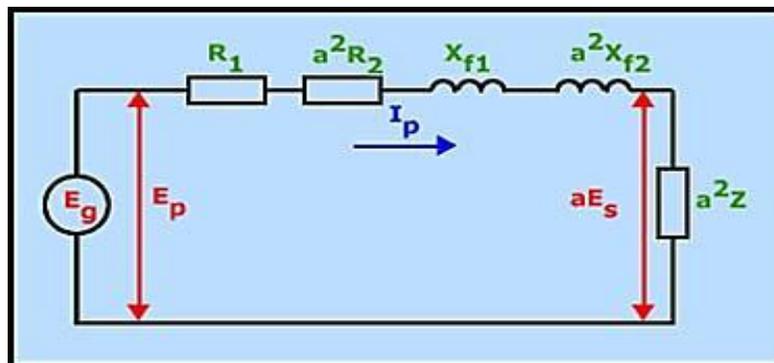


Figura. 2.3.3.

Ahora nos queda sumar los componentes para sacar sus ecuaciones:

$$R_p = R_1 + a^2 R_2$$

$$X_p = X_{f1} + a^2 X_{f2}$$

reduciéndose el circuito de la siguiente forma:

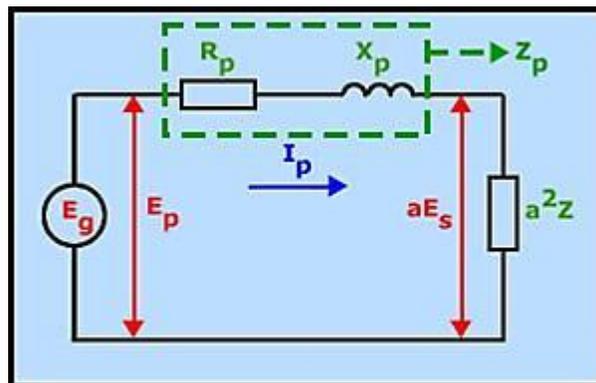


Figura. 2.3.4.

Como R_p y X_p son dos elementos resistivos podemos combinarlos para conocer la impedancia total y reducir todavía más el circuito. Obtenemos la siguiente impedancia total del transformador real.

$$Z_p = \sqrt{R_p^2 + X_p^2}$$

Con el siguiente nuevo dibujo:

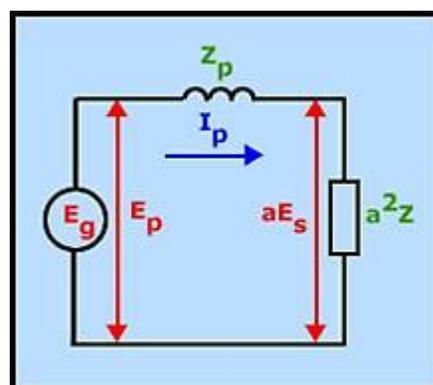


Figura. 2.3.5.

La impedancia total del transformador real Z_p es importante y lo suministra el fabricante, porque cuando se conecta una carga hay una caída de tensión interna, lo cual da a entender que Z_p afecta a la hora de regular la tensión del transformador.

2.4. CONEXIONES TRIFASICAS:

Los principales sistemas de generación y distribución de potencia en el mundo son sistemas trifásicos de corriente alterna (ca), debido a las grandes ventajas que presentan.

En un sistema trifásico las tensiones están desplazadas 120 grados eléctricos, además la relación de transformación “a” de cualquier transformador viene dada por:

$$a = \frac{V1}{V2} = \frac{N1}{N2}$$

V1 es la tensión del primario; N1 es la relación de vueltas del secundario.

V2 es la tensión en el secundario N2 es la relación de vueltas del secundario.

Tipos de conexión en un transformador trifásico:

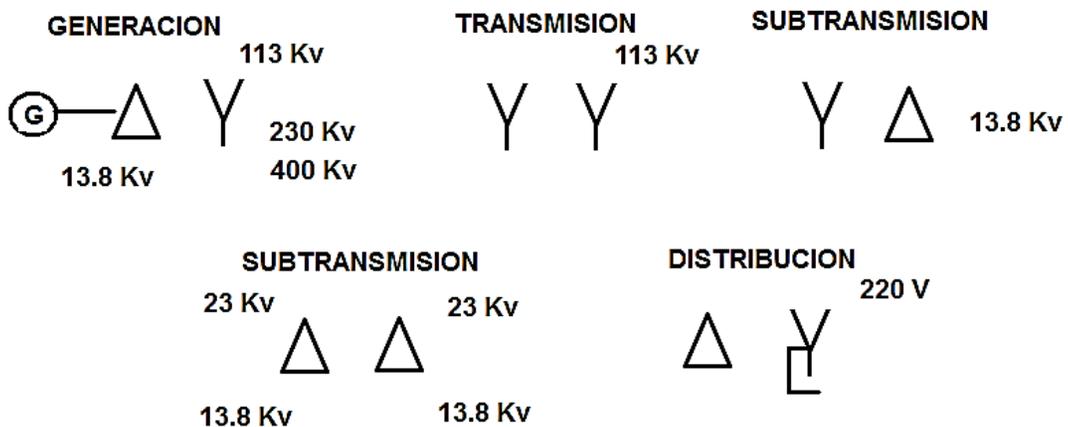
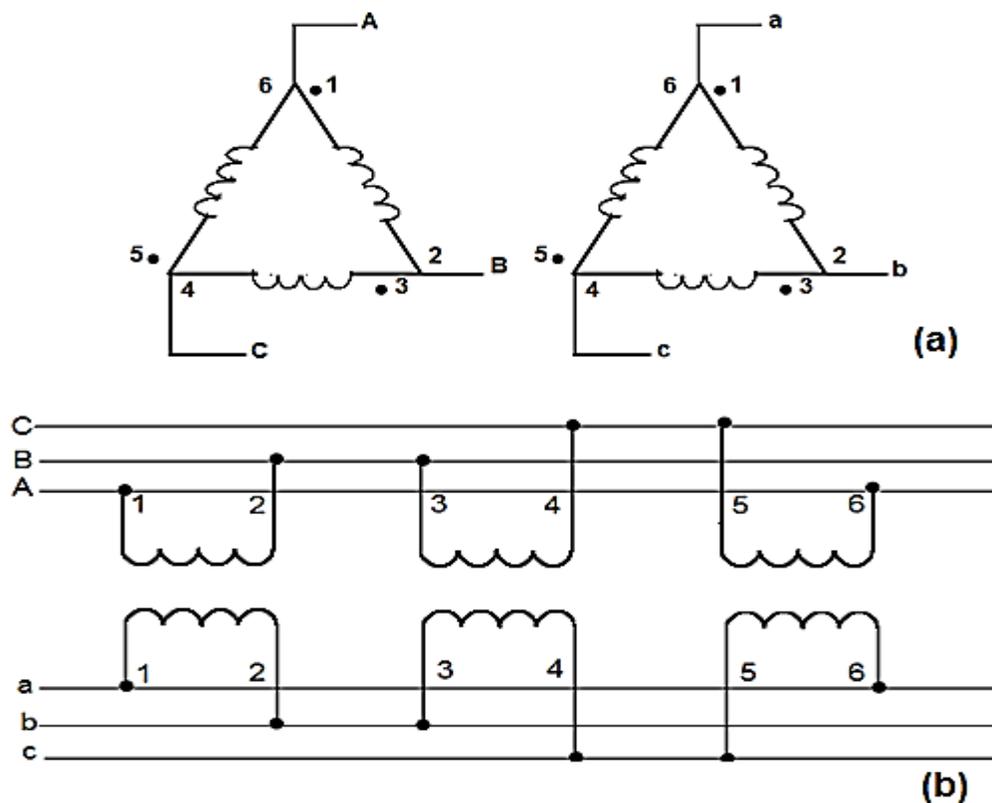


Figura. 2.4.1.

Conexión delta-delta.

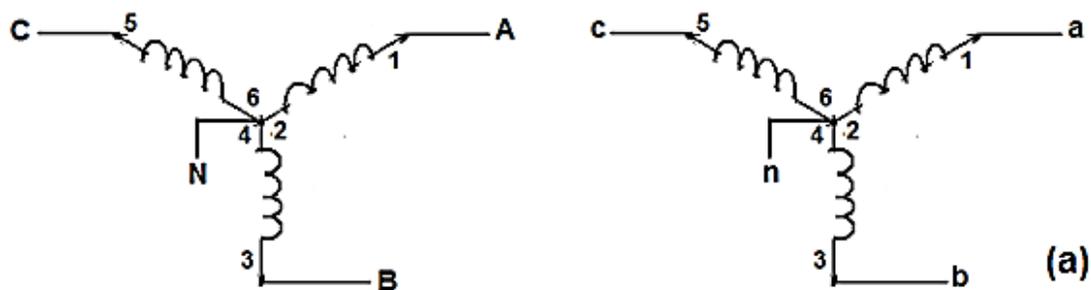
Utilizado en sistemas cuyos voltajes no son elevados, especialmente en aquellos casos en que se debe mantener la continuidad de un sistema.



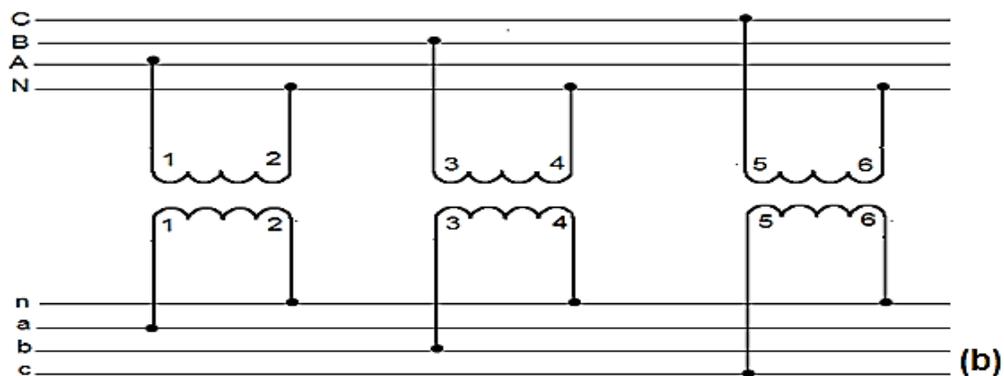
Figuras. 2.4.2. (a) y (b). Diagramas de conexión delta-delta.

Conexión estrella-estrella.

Se emplea en sistemas que operan con tensiones relativamente elevadas y en instalaciones de potencia a 4 hilos.



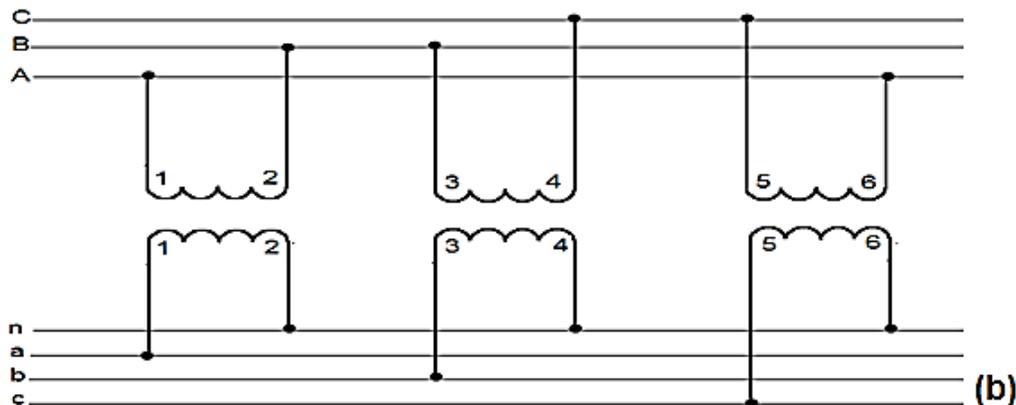
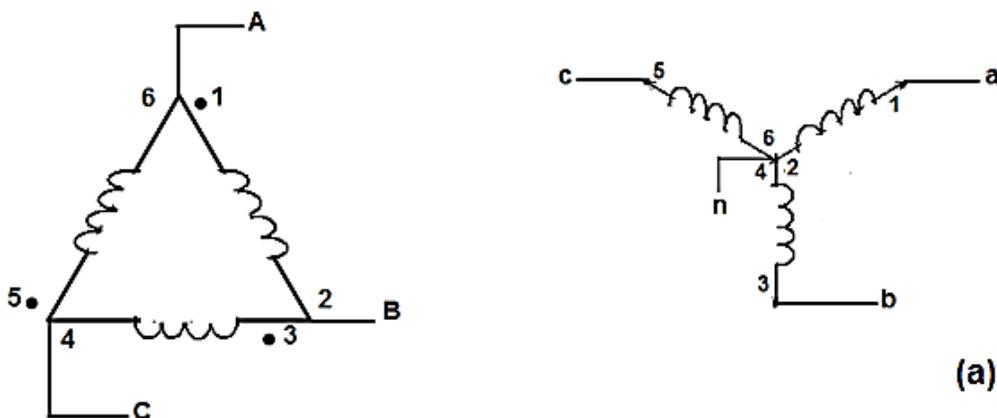
Máquinas eléctricas.



Figuras. 2.4.3. (a) y (b). Diagramas de conexión estrella-estrella.

Conexión delta-estrella.

De los más empleados, se utiliza en los sistemas de distribución (a 4 hilos) para alimentación de fuerza y alumbrado, y elevar voltajes de generación de transmisión.

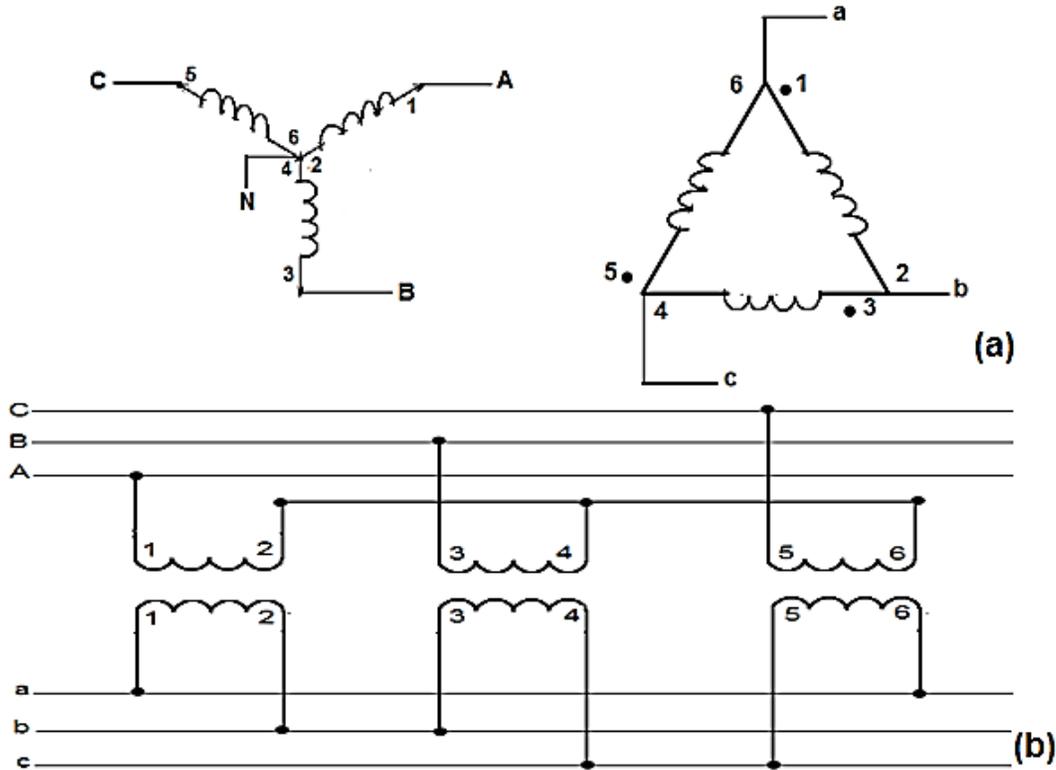


Figuras. 2.4.4. (a) y (b) Diagramas de conexión delta-estrella.

Máquinas eléctricas.

Conexión estrella-delta.

Se utiliza en sistemas de potencia para reducir los voltajes y en sistemas de distribución, esta conexión es poco usual, salvo en algunas ocasiones para distribución a tres hilos.



Figuras. 2.4.5. (a) y (b) Diagramas de conexión estrella-delta.

$$(\eta) \text{eficiencia}(\%) = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \times 100 \quad \text{ó} \quad \frac{P_{salida}}{P_{entrada} - \text{perdidas}}$$

$$(\%) \text{regulacion}(Rv) = \frac{V_{vacío} - V_{plena carga}}{V_{plena carga}} \times 100$$

Ejemplo. 1

Calcular el porcentaje de regulación de un transformador de 2300/115 volts, cuyo voltaje en vacío se midió y resultado de 119 volts.

$$\% Rv = \frac{119 - 115}{115} \times 100 = 3.47\%$$

Ejemplo. 2

El porcentaje de regulación de un transformador de distribución de 4160/220 volts es de 3.5%. Calcular el voltaje a que se elevara el devanado secundario si se quita la carga.

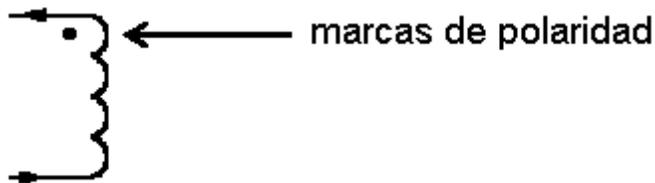
$$(Rv) = \frac{V_{vacio} - V_{plena\ carga}}{V_{plena\ carga}} \times 100 \Rightarrow V_{vacio} = (Rv \times V_{plena\ carga}) + V_{plena\ carga}$$

$$V_{vacio} = (0.035 \times 220) + 220 = 227.7\ V$$

2.5. TRANSFORMADORES EN PARALELO:

Marcas de polaridad:

(Los devanados se conectan en serie)



Se obtendrán diferentes valores de voltaje que no son nominales.

Transformadores en paralelo:

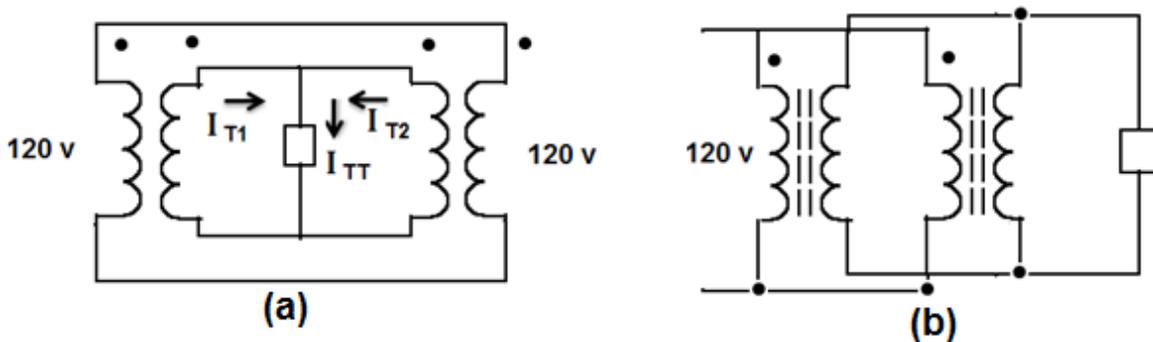
Se conectan en paralelo para proporcionar corrientes de carga mayores que la corriente nominal de cada transformador.

Reglas de conectar:

1.- Los devanados que van a conectarse en paralelo deben tener el mismo valor nominal de voltaje.

2.- los devanados que se van a conectar en paralelo deben tener polaridades idénticas.

(Si no se siguen estas reglas, se pueden producir corrientes de corto circuito excesivamente grandes).



$$I_{TT} = I_{T1} + I_{T2}$$

Figuras. 2.5.1. Transformadores en paralelo.

- Se aumenta la capacidad instalada en alguna industria o sistema, ya que resulta más conveniente conectar en paralelo otro transformador con el transformador existente para satisfacer la demanda, que instalar uno nuevo que tenga la capacidad total.
- Se desea continuidad de servicio en una instalación donde la carga se divide en dos o más transformadores en paralelo de tal manera que el servicio no quede interrumpido por falla o reparación de un transformador.
- Para repartir la carga.

Transformadores en corto circuito.

Esta prueba se lleva a cabo para determinar experimentalmente el valor de la impedancia equivalente de un transformador y las pérdidas en los devanados como su nombre lo indica, la prueba de cortocircuito en un transformador se desarrolla con uno de los devanados conectados en cortocircuito, debido a esto, al otro se le aplica durante la prueba un voltaje del 5 al 15% del voltaje nominal.

Parámetros a medir en un transformador en corto circuito.

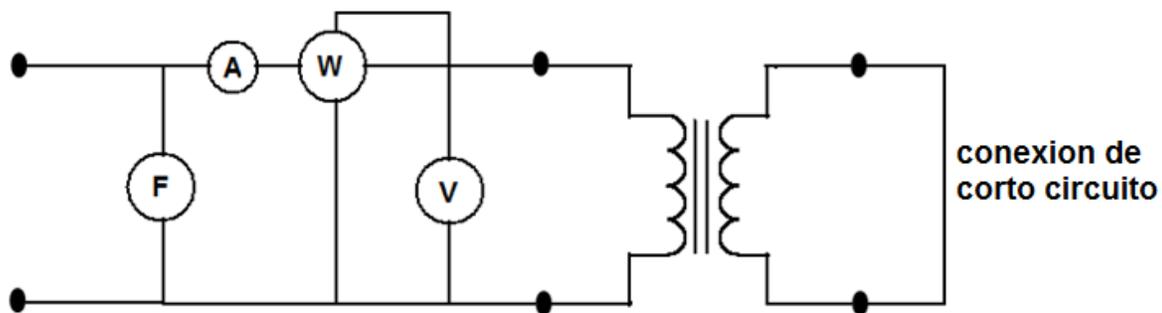


Figura. 2.5.2. Diagrama de conexiones para la ejecución de la prueba de corto circuito en un transformador.

La impedancia equivalente referida al primario es:

$$Z_{ep} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}}$$

Z_{ep} – Impedancia equivalente.

V_{CC} – Voltaje corto circuito.

I_{CC} – Corriente corto circuito.

Máquinas eléctricas.

La resistencia equivalente referida al primario es:

$$R_{ep} = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2} \Rightarrow \text{ley de Joule } P_{CC} = R_{ep} \cdot I_{CC}^2$$

La reactancia equivalente referida al primario es:

$$x_{ep} = \sqrt{Z_{ep}^2 - R_{ep}^2}$$

Igualación de la impedancia en un transformador:

$$\alpha = \frac{E_P}{E_S} = \frac{N_P}{N_S} = \frac{I_S}{I_P} \quad \frac{I_P}{I_S} = \frac{1}{\alpha}$$

Ley de Ohm:

$$V = I \cdot R \quad V = I \cdot Z \quad E = I \cdot Z$$

Despejando (Z)

$$Z = \frac{E}{I}; \quad \text{tanto } Z_P = \frac{E_P}{I_P}; \quad Z_S = \frac{E_S}{I_S}.$$

$$\frac{\frac{E_P}{I_P}}{\frac{E_S}{I_S}} = \frac{\alpha}{\frac{1}{\alpha}} = \frac{E_P \cdot I_S}{E_S \cdot I_P} = \alpha^2$$

Dividir $I_S \cdot I_P$

$$\frac{\frac{E_P \cdot I_S}{I_S \cdot I_P}}{\frac{E_S \cdot I_P}{I_S \cdot I_P}} = \alpha^2 \Rightarrow \frac{\frac{E_P}{I_P}}{\frac{E_S}{I_S}} = \alpha^2 \Rightarrow \frac{Z_P}{Z_S} = \alpha^2 \Rightarrow Z_P = \alpha^2 \cdot Z_S \Rightarrow Z_P = \alpha^2 \cdot Z_L$$

2.6. AUTOTRANSFORMADOR.

El autotransformador es una máquina que funciona como un transformador común el autotransformador se caracteriza por su construcción ya que este tiene un solo bobinado en un autotransformador, la porción común del devanado único actúa como parte tanto del devanado "primario" como del "secundario". La porción restante del devanado recibe el nombre de "devanado serie" y es la que proporciona la diferencia de tensión entre ambos circuitos, mediante la adición en serie con la tensión del devanado común.

La transferencia de potencia entre dos circuitos conectados a un autotransformador ocurre a través de dos fenómenos: el acoplamiento magnético (como en un transformador común) y la conexión galvánica (a través de la toma común) entre los dos circuitos De igual manera, un transformador incrementa su capacidad de transferir potencia al ser conectado como autotransformador.

Máquinas eléctricas.

Tipos de autotransformador:

a).- Autotransformador reductor:

Si se aplica una tensión alterna entre los puntos A y B, y se mide la tensión de salida entre los puntos C y D, se dice que el autotransformador es reductor de tensión.

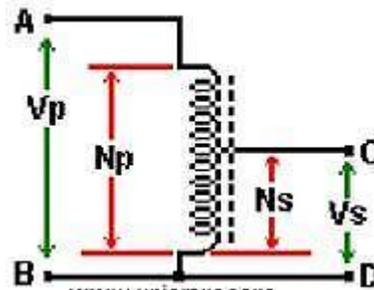


Figura. 2.6.1. Autotransformador reductor.

Relación de vueltas $N_s / N_p < 1$

b).- Autotransformador elevador:

Si se aplica una tensión alterna entre los puntos C y D, y se mide la tensión de salida entre los puntos A y B, se dice que el autotransformador es elevador de tensión.

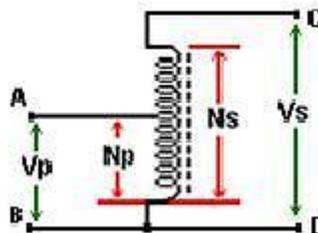


Figura. 2.6.2. Autotransformador elevador.

Relación de vueltas $N_s / N_p > 1$

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y OPERACIÓN.

El principio de funcionamiento es el mismo que el del transformador común, entonces la relación de transformación entre las tensiones y las corrientes y el número de vueltas se mantiene.

Las corrientes primaria y secundaria están en oposición y la corriente total que circula por las espiras en común es igual a la diferencia de la corriente del devanado de baja tensión y el devanado de alta tensión.

Para que un autotransformador funcione adecuadamente los dos devanados deben tener el mismo sentido de bobinado.

Máquinas eléctricas.

Operación:

Tiene un solo bobinado arrollado sobre el núcleo, pero dispone de cuatro bornes, dos para cada circuito, y por ello presenta puntos en común con el transformador

Consta de un bobinado de extremos A y D, al cual se le ha hecho una derivación en el punto intermedio B. Por ahora llamaremos primario a la sección completa A D y secundario a la porción B D, pero en la práctica puede ser a la inversa, cuando se desea elevar la tensión primaria.

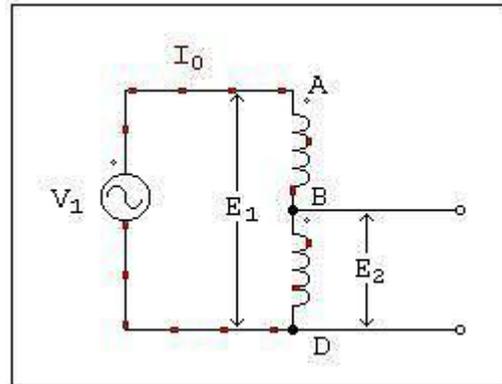


Figura. 2.6.3. Operación del Autotransformador.

La tensión de la red primaria, a la cual se conectará el autotransformador, es V_1 , aplicada a los puntos A y D, mostrados en la fig. 2.6.3. Como toda bobina con núcleo de hierro, en cuanto se aplica esa tensión circula una corriente que hemos llamado de vacío en la teoría anterior. Sabemos también, que esa corriente de vacío está formada por dos componentes; una parte es la corriente magnetizante, que está atrasada 90° respecto de la tensión, y otra parte que está en fase, y es la que cubre las pérdidas en el hierro, cuyo monto se encuentra multiplicando esa parte de la corriente de vacío, por la tensión aplicada. Llamamos a la corriente total de vacío I_0 , como lo hemos hecho en otras oportunidades.

Limitaciones:

Dentro de los autotransformadores existen limitaciones de funcionamiento que se dará a conocer a continuación.

- a) Una falla en el aislamiento de los devanados de un autotransformador puede producir que la carga quede expuesta a recibir plena tensión (la de la fuente). Se debe tener en cuenta esta situación al decidir utilizar un autotransformador para una determinada aplicación.
- b) Las ventajas en ahorro de material tienen una limitación física, que en la práctica es una relación de voltajes de 3:1. Para relaciones de tensión mayores a ésta, o bien el transformador convencional de dos devanados es más compacto y económico, o bien resulta imposible construir el autotransformador.

Máquinas eléctricas.

- c) En sistemas de transmisión de energía eléctrica, los autotransformadores tienen la desventaja de no filtrar el contenido armónico de las corrientes y de actuar como otra fuente de corrientes de falla a tierra.
- d) Existe una conexión especial -llamada "conexión en "ZIG-ZAG" que se emplea en sistemas trifásicos para abrir un camino de retorno a la corriente de tierra que de otra manera no sería posible lograr, manteniendo la referencia de tierra del sistema.

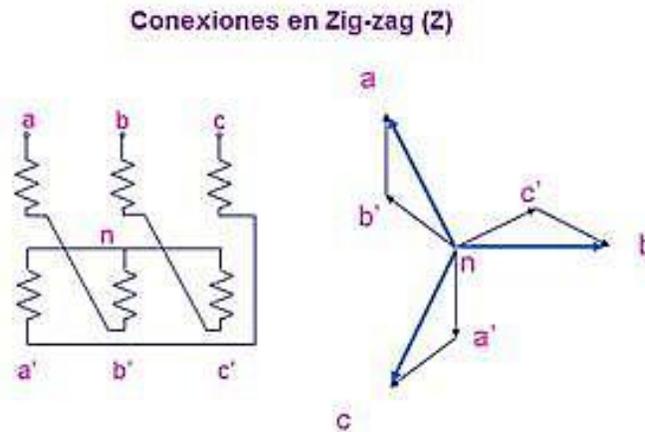


Figura. 2.6.4. Conexión zig-zag (Z)

Ventajas y desventajas.

A continuación se dará a conocer las ventajas y desventajas de los autotransformadores en resumen decimos que existe una gran gama de ventajas de los autotransformadores.

1. VENTAJAS.

- Solo un porcentaje de la energía se trasmite por inducción.
- El autotransformador por sus características se viene a ser de menor tamaño por lo que ocuparía menor espacio.
- Existe menor flujo del campo y menor tamaño del núcleo de hierro.
- Se obtienen autotransformadores más livianos.
- El autotransformador lleva un solo bobinado.
- Menores caídas de tensión.
- Menor intensidad de vacío.
- Es más fácil de construir y requiere menos cobre.
- En consecuencia es más económico.

Máquinas eléctricas.

- Parte de la energía del autotransformador se transmite eléctricamente.
- Las pérdidas eléctricas siempre son menores que las pérdidas magnéticas.
- El autotransformador tiene mayor rendimiento.
- El autotransformador genera más potencia que un transformador normal de especificaciones similares.
- Tiene una tensión de cortocircuito pequeña lo que plantea el inconveniente de que la corriente en caso de corto circuito es elevada.
- Transfiere más potencia que un transformador normal.

2. DESVENTAJAS.

- La principal desventaja de los autotransformadores es que a diferencia de los transformadores ordinarios hay una conexión física directa entre el circuito primario y el secundario, por lo que se pierde el aislamiento eléctrico en ambos lados.
- Peligro del corte de una espira, lo que produciría que el secundario quede sometida a la tensión del primario.
- Conducción galvánica entre el primario y secundario.
- Baja regulación de tensión debido a su baja impedancia equivalente.
- Debido a la construcción eléctrica del dispositivos, la impedancia de entrada del autotransformador es menor que de un transformador común. Esto no es ningún problema durante el funcionamiento normal de la máquina, pero si por alguna razón se produce un cortocircuito a la salida.
- La salida del transformador no está aislada con la entrada, este se vuelve inseguro para la persona que lo opera.
- No tienen aislamientos en los primarios y secundario.

2.7. EJERCICIOS DE TRANSFORMADORES*:

2.7.1.- Un transformador tiene 120 vueltas en el primario y 720 vueltas en el secundario. Si su corriente de carga es 0.833, ¿Cuál es el componente de carga de la corriente del primario?

$$I_P = \frac{N_S \cdot I_S}{N_P} = \frac{(720 e)(0.833 A)}{120 e} = 4.998 A$$

2.7.2.- ¿Cuál es la relación de vueltas del transformador del problema 1?

$$\alpha = \frac{N_P}{N_S} = \frac{120}{720} = 0.166 e$$

2.7.3.- ¿Cuál sería la relación de vueltas del transformador del problema 2.7.1, si la bobina de 720 vueltas se usara como primaria?

$$\alpha = \frac{N_P}{N_S} = \frac{720}{120} = 6 e$$

2.7.4.- Si un transformador ideal tiene una relación de vueltas de 10 y un voltaje de línea en el primario de 230 V, ¿Cuál es el voltaje en el secundario?

$$\alpha = \frac{V_P}{V_S} \therefore V_S = \frac{230}{10} = 23 V$$

2.7.5.- En una situación de transformador ideal, si el voltaje de salida es de 120 V a 8.333 A y el voltaje de entrada es de 240 V; ¿Cuál es la corriente de entrada?

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} \therefore I_P = \frac{I_S \cdot V_S}{V_P} = \frac{(8.333 A)(120 V)}{240 V} = 4.167 A$$

2.7.6.- Un transformador de 2300 a 230 V, 60 Hz y 2 KVA; se especifica con 1.257 V/vuelta de sus bobinas de devanado. Suponga que se trata de un transformador ideal y calcule.

a) El factor de transformación de reducción.

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{2300}{230} = 10$$

b) Las vueltas totales de la bobina de alta tensión.

$$\frac{V_P}{N_P} = 1.257 \frac{V}{e} \therefore N_P = \frac{V_P}{1.257} = \frac{2300}{1.257} = 1829.75 \approx 1830 e$$

c) Las vueltas totales de la bobina de baja tensión.

$$N_S = \frac{N_P}{\alpha} = \frac{1830}{10} = 183 e$$

2.7.7.- Usando el problema (transformador) del problema 2.7.6, ¿Cuál es su corriente de secundario?

$$P = V_S \cdot I_S \therefore I_S = \frac{P}{V_S} = \frac{2 \text{ KVA}}{230 \text{ V}} = 8.69 \text{ A}$$

2.7.8.- Con el transformador del problema 2.7.6, ¿cuál sería su flujo magnético máximo en el núcleo (a) en el sistema inglés, (b) en el sistema internacional?

$$\Phi_{max} = \frac{V_S}{4.44 \times F \times N_S} = \frac{230}{4.44 \times 60 \times 183} = 4.717 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$\Phi_{max} = 4.717 \times 10^{-3} \text{ Wb} \left(\frac{1 \text{ linea}}{10^{-8}} \right) = 4.717 \times 10^5 \text{ lineas}$$

2.7.9. Se prueba un transformador de 10 KVA, &= Hz, 4800/240 V a circuito abierto y en cortocircuito. Los resultados de la prueba son los siguientes.

prueba	V	A	W	Lado que se usa
A circuito abierto	240	1.5	160	Bajo voltaje
En corto circuito	180	2.083	180	Alto voltaje

A partir de los siguientes datos anteriores, calcular:

a).- La resistencia y reactancia equivalente, referidas al lado de alto voltaje.

$$R_P; X_P; \quad Z = \sqrt{X^2 + R^2}$$

$$P = V \cdot I \Rightarrow P = (IR)I \Rightarrow P = R \cdot I^2 \Rightarrow R = \frac{P}{I^2}$$

$$R_P = \frac{P}{I^2} = \frac{180}{(2.083)^2} = 41.48 \Omega$$

En un circuito abierto no se sabe la impedancia.

$$Z = \frac{V}{I}; \quad Z_P = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} = \frac{180}{2.083} = 86.41 \Omega$$

$$X_P = \sqrt{Z^2 - R^2} \Rightarrow X_P = \sqrt{(86.41)^2 - (41.48)^2} \Rightarrow X_P = \sqrt{7467.34 - 1720.59}$$

$$X_P = 75.80 \Omega$$

b).- La resistencia y reactancia equivalentes, referidas al lado de bajo voltaje.

$$Z_S; R_S; X_S;$$

Máquinas eléctricas.

$$\alpha = \frac{4800}{240} = 20$$

$$R_S = \frac{R_P}{\alpha^2} = \frac{41.48}{(20)^2} = 0.1037 \Omega$$

$$Z_P = \alpha^2 \cdot Z_S \Rightarrow 86.41 = (20)^2 \cdot Z_S \Rightarrow Z_S = \frac{86.41}{(20)^2} = 0.21 \Omega$$

$$X_S = \frac{X_P}{\alpha^2} = \frac{75.80}{(20)^2} = 0.1895 \Omega;$$

$$R_S = \sqrt{Z^2 - X^2} \Rightarrow R_S = \sqrt{(0.21)^2 - (0.1895)^2} = 0.1037 \Omega$$

c).- La regulación de voltaje del transformador de bajada, a f.p. unidad y (plena carga).

$$\%RV = \frac{V_{SC} - V_{PC}}{V_{PC}} \times 100$$

Datos nominales:

$$V_{SC} = (V_2 \cos\Phi + I_2 R_{e2}) + j(V_2 \sin\Phi + I_2 X_{e2}); \quad I_2 = \frac{10 \text{ KVA}}{240 \text{ V}} = 41.66 \text{ A.}$$

$$V_{SC} = (240(1) + (41.66)(0.1037)) + j(240(0) + (41.66)(0.1895))$$

$$V_{SC} = 244.3201 + j 7.8945$$

$$V_{SC} = 244.44 \angle 1.85^\circ \text{ volts}$$

$$V_{SC} = (V_1 \cos\Phi + I_1 R_{e1}) + j(V_1 \sin\Phi + I_1 X_{e1}); \quad I_1 = \frac{10 \text{ KVA}}{4800 \text{ V}} = 2.083 \text{ A.}$$

$$V_{SC} = (4800(1) + (2.083)(41.48)) + j(4800(0) + (2.083)(75.80))$$

$$\%RV = \frac{V_{SC} - V_{PC}}{V_{PC}} \times 100 \Rightarrow \%RV = \frac{244.44 - 240}{240} \times 100 = 1.85 \%$$

$$\%RV = \frac{4888.95 - 4800}{4800} \times 100 = 1.85 \%$$

2.7.10. Para los datos de las pruebas a circuito abierto y cortocircuito del problema 2.7.9, calcular:

a) La resistencia equivalente del transformador, referida al lado de bajo voltaje.

$$R_P = \alpha^2 \cdot R_S; \Rightarrow R_S = \frac{R_P}{\alpha^2} = \frac{41.48}{(20)^2} = 0.1037 \Omega$$

Máquinas eléctricas.

b) La eficiencia a plena carga, a un f.p. 0.9 en retraso.

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{salida} + perdidas} = \frac{9000 W}{9340 W} = 0.9635 = 96.35\%$$

$$P_{salida} = 10 KVA \cos \Phi = 10 KVA (0.9) = 9 KW$$

$$P_{salida} + perdidas = 9 Kw + 0.160 Kw + 0.180 Kw = 9340 W$$

c) La eficiencia a media carga a un f.p. 0.9 en retraso.

$$P_{salida} = \left(\frac{1}{2}\right) \times (10 KVA) \times (0.9) = 4500 W$$

$$P_{vacio} = 160 W$$

$$P_{cc} = (180 W) \times (\eta)^2 = (180) \times \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 45 W$$

$$P_{entrada} \text{ o } P_{salida} + perdidas = 4500 + 160 + 45 = 4705 W$$

$$\eta = \frac{4500}{4705} = 0.9564 = 95.64 \%$$

2.8. Material didáctico*:

1. <http://www.tuveras.com/maquinaselectricas.htm>
2. <http://www.tuveras.com/transformador/previos.htm>
3. http://www.tuveras.com/transformador/eltransformador_ideal.htm
4. http://www.tuveras.com/transformador/eltransformador_real.htm
5. http://www.tuveras.com/transformador/transformador_ensayos.htm
6. http://www.tuveras.com/transformador/eltransformador_potencias.htm
7. <http://www.tuveras.com/transformador/reduccion.htm>
8. <http://www.tuveras.com/transformador/autotransformador.htm>
9. <http://www.tuveras.com/eltrafotrifasico/eltrafotrifasico.htm>
10. http://www.tuveras.com/eltrafotrifasico/autotransformador_trifasico.htm
11. <http://www.tuveras.com/eltrafotrifasico/caracteristicas.htm>
12. <http://www.tuveras.com/eltrafotrifasico/acoplamiento.htm>
13. <http://electricidad-ibf.blogspot.mx/p/el-transformador.html>
14. <http://www.youtube.com/watch?v=O1rkRMrR0eg>
15. <http://www.youtube.com/watch?v=WNXRLPUNAUU>
16. <http://www.youtube.com/watch?v=TsAZrzfH-OU>
17. <http://www.youtube.com/watch?v=M4jMkdTFOs>

3. MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA.

3.1. ESTRUCTURA:

PIEZAS DE UN MOTOR DE ROTOR JAULA DE ARDILLA.

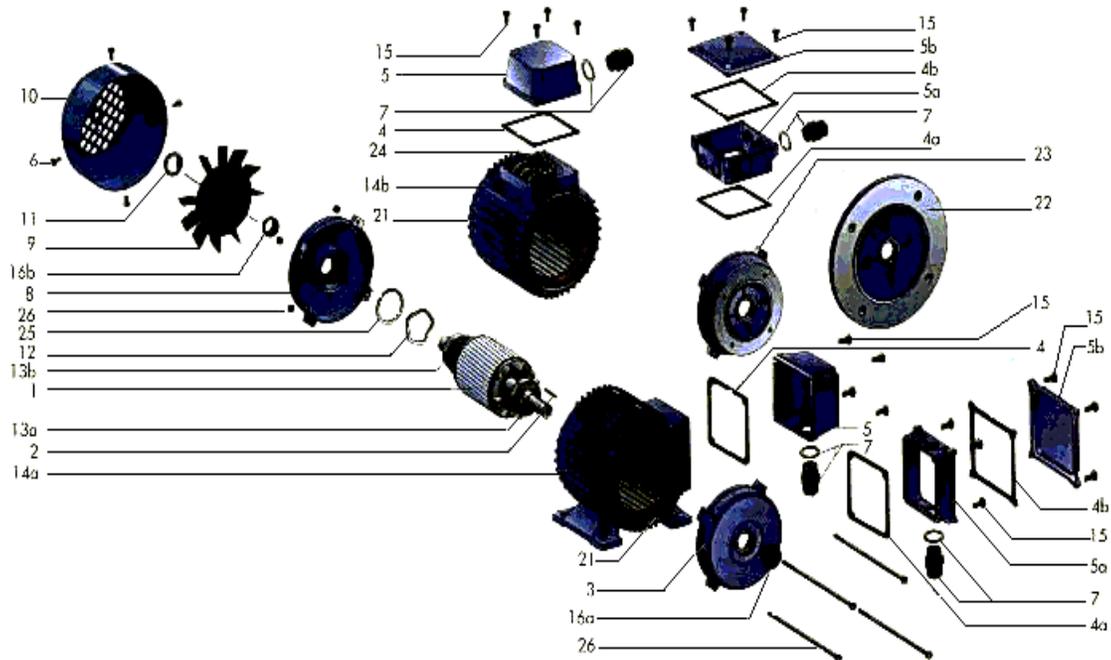
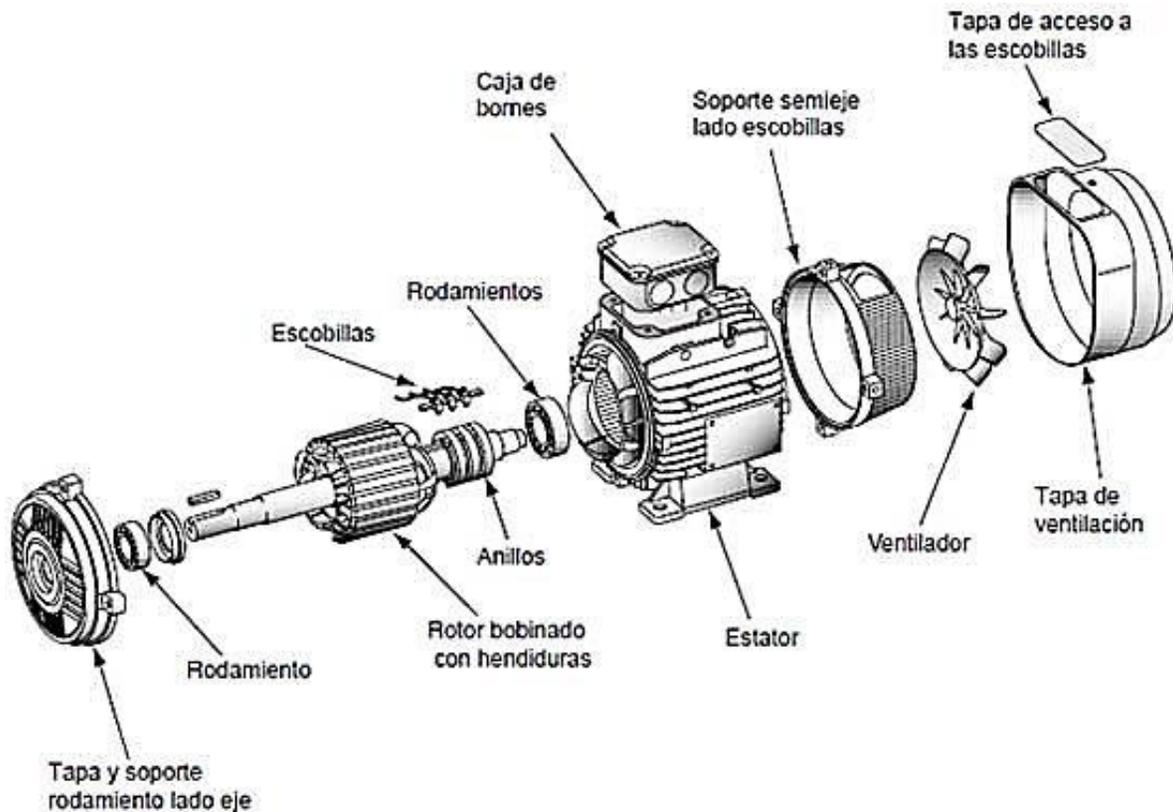


Figura. 3.1.1. COMPONENTES.

<p>1. Rotor y eje del motor. 2. Chaveta. 3. Escudo delantero. 4. Junta caja de Bornes IP55. 4a. Junta caja de Bornes IP65. 4b. Junta caja de Bornes IP65. 5. Tapa caja de Bornes IP55. 5a. Tapa caja de Bornes IP65. 5b. Tapa caja de Bornes IP65. 6. Tornillos caja de bornes.</p>	<p>13b. Rodamiento posterior. 14a. Carcasa B3. 14b. Carcasa B5. 15. Tornillos capot ventilador. 16a. Retén anterior. 16b. Retén posterior. 17. Tapa exterior del rodamiento delantero. 18. Tapa interior del rodamiento delantero. 19. Tapa exterior del rodamiento trasero.</p>
<p>7. Prensaestopa. 8. Escudo posterior. 9. Ventilador de refrigeración. 10. Tapa del ventilador. 11. Abrazadera del ventilador. 12. Arandela ondulada de acero para compensación. 13a. Rodamiento anterior.</p>	<p>20. Tapa interior del rodamiento trasero. 21. Bobinado del estator. 22. Brida B5. 23. Brida B14. 24. Placa de bornes con componentes de metal. 25. Arandela espaciadora. 26. Espárragos y tuercas.</p>

PIEZAS DE UN MOTOR DE ROTOR DEVANADO



Despiece de un motor de rotor con anillos.

Figura. 3.1.2.

MOTORES DE INDUCCION DE CORRIENTE ALTERNA:

La máquina de inducción es la más resistente y ampliamente usada en la industria, desde el punto de vista constructivo, como una máquina de corriente directa (C.D.), la máquina de inducción tiene un estator y un rotor montado sobre chumaceras y separado del estator por un entrehierro.

La corriente alterna (C.A.) se alimenta al devanado del estator directamente y al devanado del rotor por inducción, de aquí el nombre de MAQUINA DE INDUCCION.

La máquina de inducción puede operar tanto como motor como generador, sin embargo, su uso preferente es como motor y se construye en varios tamaños y variantes para distintas aplicaciones:

- **Motores de inducción pequeños monofásicos:** (en capacidades de potencia fraccionarias), usados en muchas aplicaciones de aparatos del hogar, tales como: licuadoras, lavadoras, refrigeradores, maquinas herramientas, transportadores, etc.

- **Motores de inducción trifásicos grandes:** (de decenas y cientos de caballos de fuerza) usados en bombas, ventiladores, compresores, molinos de papel, industria textil, industria petrolera, industria cementera, etc.
- **Motores de inducción lineales usados en transporte.**
- **Motores de inducción bifásicos:** Que principalmente se usan como servomotor en los sistemas de control.

Aun cuando el diseño básico de los motores de inducción no ha cambiado mucho en los últimos 50 años, los materiales aislantes modernos, las técnicas de optimización del diseño basado en computadora y los métodos automatizados de manufactura han dado como resultado motores de menor tamaño físico y de menor costo por kW. La estandarización internacional de las dimensiones físicas y tamaños de carcasas significa que motores de distintos fabricantes sean físicamente intercambiables y tengan características de comportamiento similares.

La confiabilidad de los motores de inducción de jaula de ardilla comparada con la de los motores de corriente directa (C.D.) es alta, las únicas partes del motor jaula de ardilla que se pueden desgastar son las chumaceras, y las mejoras en las modernas chumaceras prelubricadas han extendido aún más la vida de estos motores.

LA CONSTRUCCION BASICA.

El motor de inducción de corriente alterna (C.A.) está compuesto de dos partes electromagnéticas:

- Una parte estacionaria llamada **estator**.
- Una parte rotatoria llamada **rotor**, soportada en cada extremo por chumaceras.

El estator y el rotor, cada uno, están constituidos de:

- **Un circuito eléctrico** construido de cobre aislado o aluminio para conducir la corriente.
- **Un circuito magnético** construido de acero laminado, que es el que transporta el flujo magnético.

EL ESTATOR:

El estator es la parte estacionaria externa del motor y consiste de:

- **La carcasa cilíndrica externa del motor**, la cual está hecha ya sea de placa de acero soldada, hierro fundido o aleación de aluminio fundida; la carcasa puede incluir la base para montaje.
- **El circuito magnético** que está constituido de una serie de laminaciones ranuradas, de acero al silicio empaquetadas dentro de un espacio cilíndrico **dentro de la carcasa**. El circuito magnético esta laminado para reducir las corrientes circulantes,

con lo cual se tienen pérdidas menores, y en consecuencia, también menor calentamiento.

- **Un grupo de bobinas aisladas eléctricamente.** Estas bobinas se colocan dentro de las ranuras del circuito magnético ranurado. El área de la sección transversal de los conductores de estas bobinas debe ser suficientemente grande, de acuerdo a la potencia del motor. Para un motor trifásico, se requiere de tres grupos de bobinas, uno, por fase.

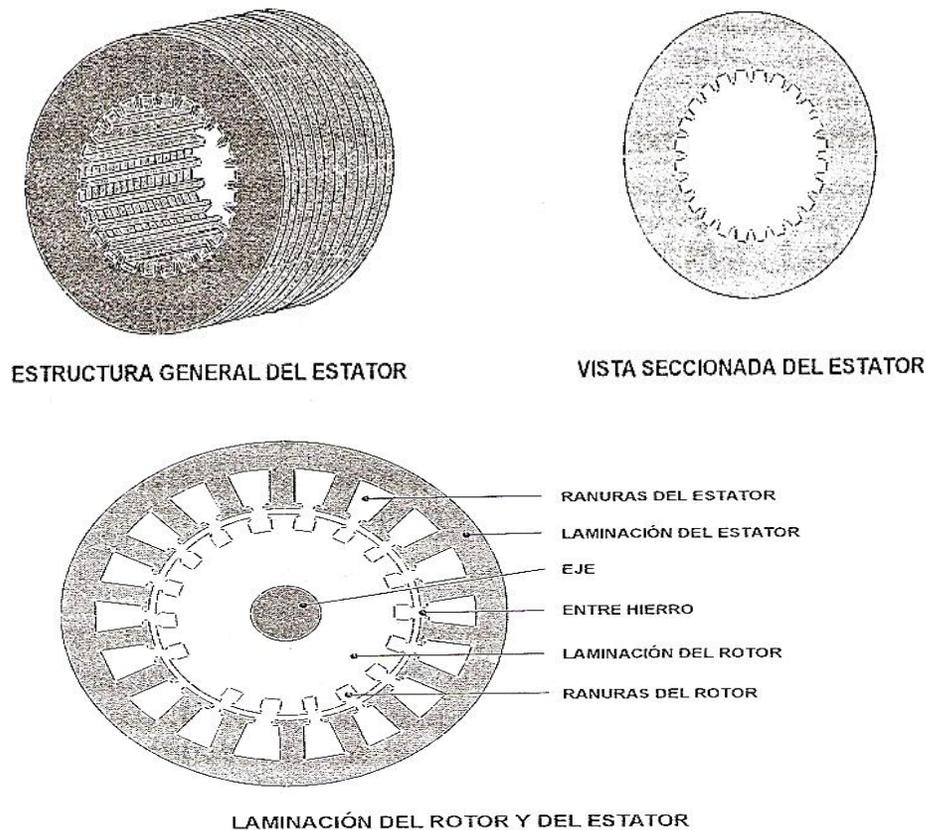


Figura. 3.1.3.

El rotor.

Esta es la parte del motor, así como el estator, el rotor consiste de un grupo de laminaciones de **acero ranuradas y** empacadas juntas en la forma de un cilindro magnético y con un circuito eléctrico. El circuito eléctrico del rotor puede ser cualquiera de los siguientes:

- **Tipo rotor devanado.** El cual tiene 3 grupos de devanados aislados con conexiones llevadas al exterior a 3 anillos rozantes montados sobre el eje, las conexiones externas a la parte rotatoria se hacen a través de escobillas montadas

sobre los anillos rozantes, por lo que este tipo de motor se le llama con frecuencia **motor de anillos rozantes**.

- **Tipo rotor jaula de ardilla.** El cual comprende un grupo de barras de cobre o aluminio instaladas dentro de las ranuras, las cuales están conectadas a un anillo en los extremos del rotor. La construcción de los devanados del rotor asemeja a una “jaula de ardilla”.

Las barras de aluminio del rotor están usualmente embebidas en las ranuras del rotor, lo que hace que sea una **construcción muy robusta**, aun cuando las barras de aluminio del rotor están en contacto directo con las laminaciones de aluminio, prácticamente toda la corriente del rotor que circula a través las barras de aluminio no lo hace por las laminaciones.

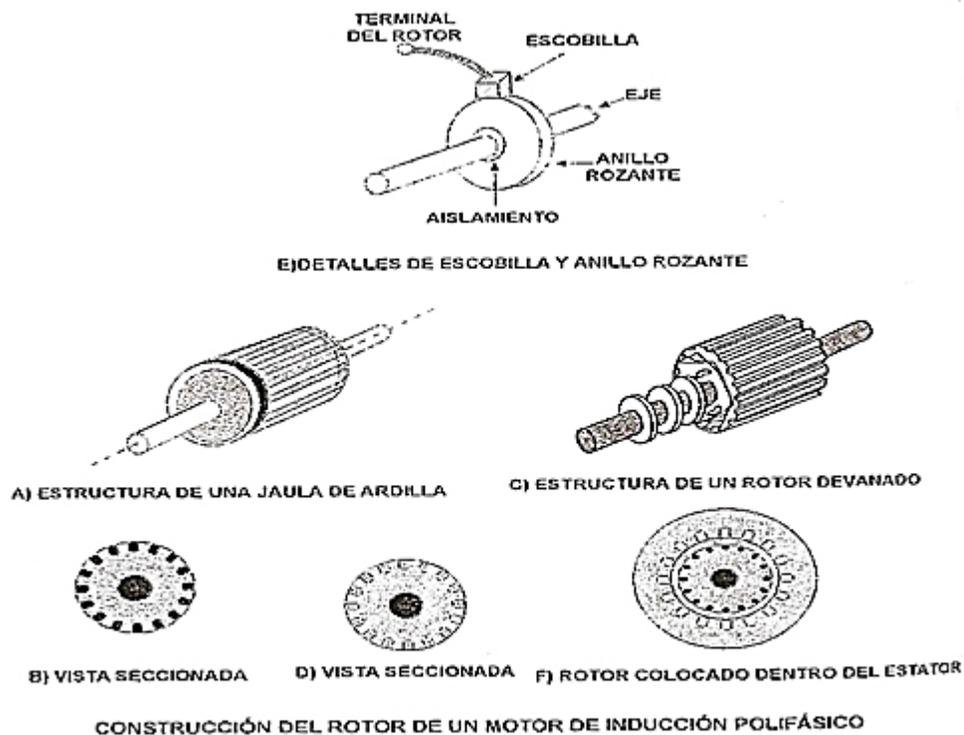
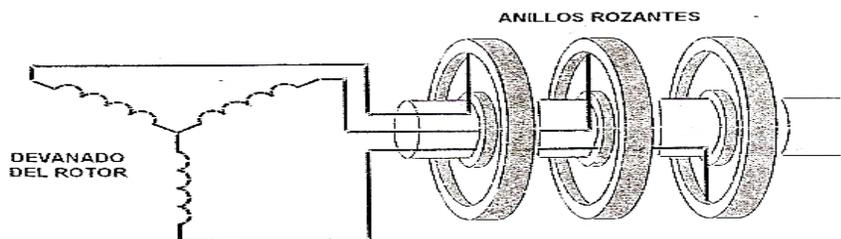
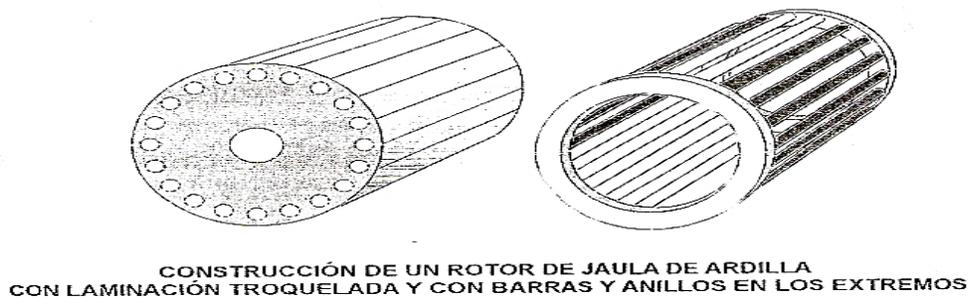
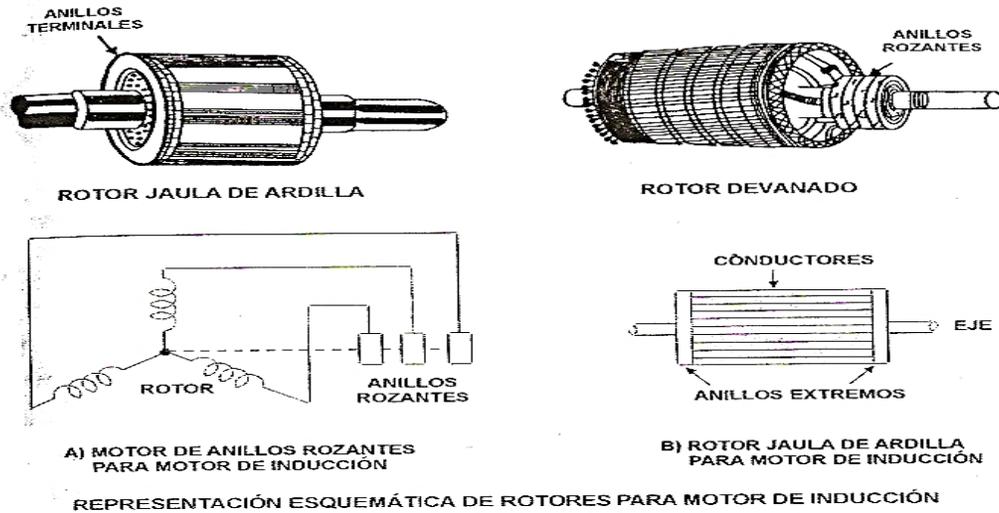


Figura. 3.1.4.

La representación básica de estos rotores, es usada para identificar sus partes y para comprender más adelante lo relacionado con el control de velocidad en los motores.



CADA DEVANADO DEL ROTOR SE CONECTA A UN ANILLO DESLIZANTE SEPARADO

Figura. 3.1.5.

OTRAS COMPONENTES DEL MOTOR DE INDUCCION.

Las otras partes requeridas para completar el motor de inducción son:

- **Dos tapas** extremas que contienen a las chumaceras (una en cada extremo).
- **Dos chumaceras** o baleros para soportar a la flecha o eje rotatorio.
- **Ventilador de enfriamiento**, localizado en el extremo de accionamiento y que permite proporcionar el enfriamiento forzado para el estator.
- **Caja de conexiones terminales.** En la parte superior o lateral se encuentra esta caja para recibir las conexiones eléctricas externas.

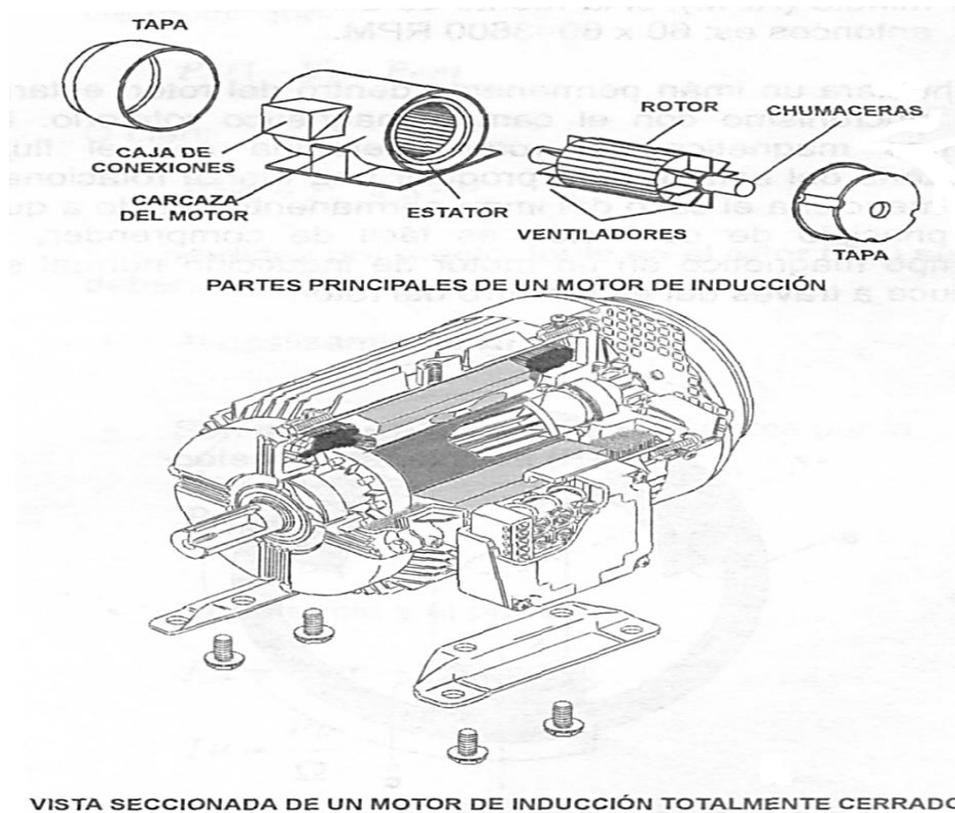


Figura. 3.1.6.

3.2. FUNCIONAMIENTO (principios de operación).

Cuando se conecta una trifásica de C.A. a las terminales del estator de un motor de inducción trifásico, tres corrientes alternas circulan en los devanados del estator, estas corrientes producen un campo magnético cambiante que gira alrededor del interior del estator. La velocidad de rotación está en sincronismo con la frecuencia del sistema y se le llama “**la velocidad de sincronismo**”.

En el tipo más simple de motor de inducción trifásico, el campo rotatorio está producido por tres devanados fijos del estator, separados 120° alrededor del perímetro del estator. Cuando se conectan los tres devanados del estator a la fuente de alimentación trifásica, el flujo completa una rotación para **cada ciclo** del voltaje de alimentación. Para una fuente de alimentación de 50Hz, el flujo de estator gira a una velocidad de 50 revoluciones por segundo o $50 \times 60 = 3000$ revoluciones por minuto (RPM), si la fuente de alimentación es de 60 HZ, entonces es: $60 \times 60 = 3600$ RPM.

Si hubiera un imán permanente dentro del rotor, estaría en sincronismo con el campo magnético rotatorio. El campo magnético del rotor interactúa con el flujo rotatorio del estator para producir una fuerza rotacional. Se menciona el caso del imán permanente debido a que el principio de operación es fácil de comprender, el campo magnético en un motor de inducción normal se induce a través del entrehierro del rotor.

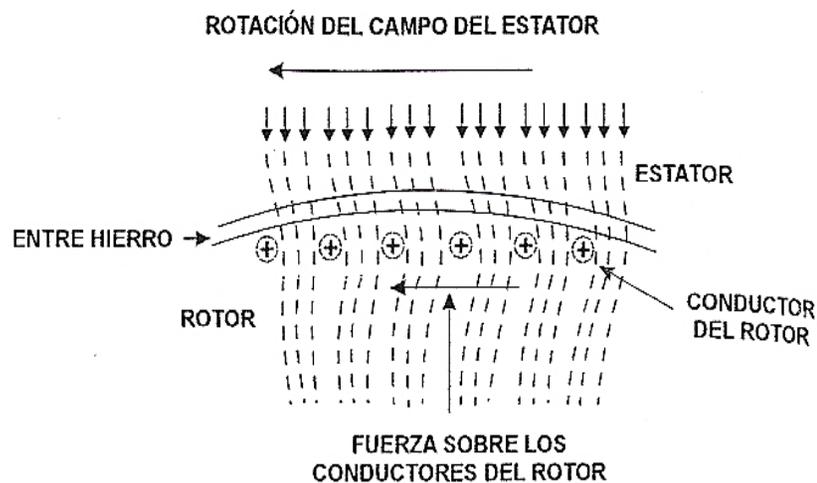
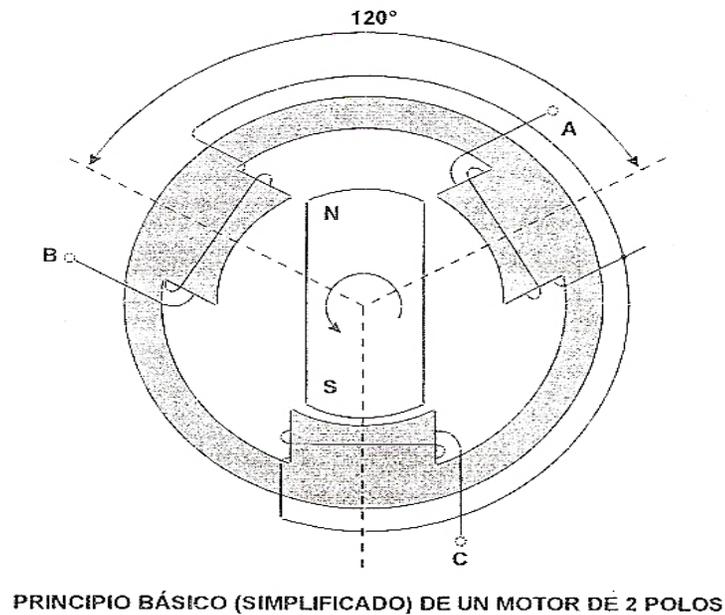
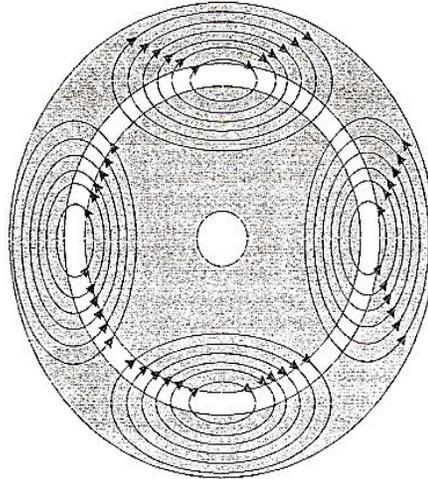


Figura. 3.2.1.

Si los tres devanados del estator fueran re arreglados a la medida de la mitad de las ranuras del estator, se habría espacio para otros tres devanados en la otra mitad del estator, el campo magnético rotatorio resultante tendría 4 polos (2 norte y 2 sur) y se llamaría un motor de 4 polos, debido a que el campo magnético rotatorio solo pasa de 3 bobinas del estator para cada ciclo de la frecuencia de alimentación, entonces gira a la mitad de la velocidad (para el caso de 50Hz, sería 1500 RPM). En consecuencia, los motores de inducción se pueden diseñar y fabricar con el número de devanados del estator para satisfacer la velocidad base requerida para distintas aplicaciones.



DISTRIBUCIÓN DE FLUJO EN UNA MÁQUINA DE 4 POLOS EN CUALQUIER MOMENTO

Figura. 3.2.2.

En los conductores del rotor, el campo giratorio inducirá unas fuerzas electromagnéticas, que al estar el devanado en cortocircuito darán lugar a unas corrientes. Éstas en presencia de un campo magnético, determinan que sobre los conductores actúen unas fuerzas, las cuales producen un par, que de acuerdo a la ley de Lenz, hace que el rotor tienda a seguir el campo del estator.

La velocidad a la cual gira el flujo del estator se le llama **velocidad síncrona** y depende entonces del número de polos del motor y de la frecuencia.

$$n_s = \frac{f \times 60}{\text{no. de pares de polos}} = \frac{f \times 60}{P/2} \text{ RPM}$$

$$n_s = \frac{f \times 120}{P} \text{ RPM}$$

Dónde:

n_s = velocidad rotacional síncrona en RPM.

f = frecuencia de alimentación en HZ.

P = número de polos en el motor.

3.3. CIRCUITO EQUIVALENTE.

Las máquinas asíncronas también se pueden utilizar como generador y como freno electromagnético. Para ser usadas como motor deben suministrar potencia mecánica, consumir potencia eléctrica y el deslizamiento debe ser $0 < s < 1$.

Para hacer un análisis circuital se utiliza el circuito equivalente de la figura (3.3.1).

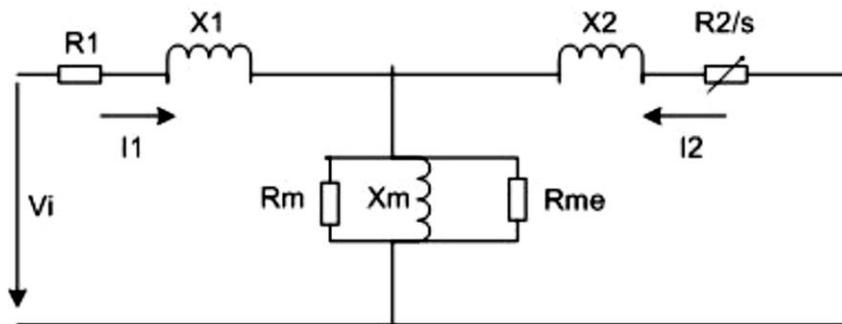


Figura. 3.3.1: Circuito equivalente del motor asíncrono incluyendo pérdidas mecánicas.

La nomenclatura utilizada es:

X_1 : Reactancia de dispersión o fugas del bobinado estatórico.

R_1 : Resistencia óhmica del bobinado estatórico.

R_m : Resistencia que representa a las pérdidas magnéticas.

X_m : Reactancia que representa a la corriente magnetizante.

R_{me} : Resistencia variable que representa las pérdidas mecánicas.

X_2 : Reactancia de dispersión o fugas del bobinado de rotor.

R_2 : Resistencia óhmica del bobinado de estator.

3.4. MOTOR TRIFASICO JAULA DE ARDILLA.

Clasificación de los motores de inducción.

De acuerdo a sus características de par, intensidad y velocidad, la NEMA, ha clasificado a los motores de inducción en diferentes clases.

3.4.1. CLASE A.

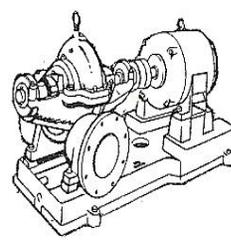
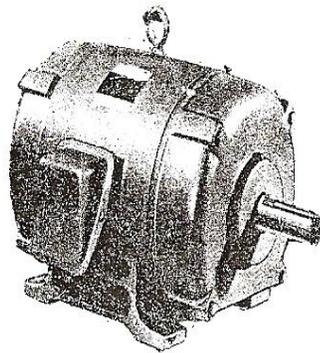
Este motor diseñado con un par de arranque normal, alrededor de 150% de régimen. Su corriente de arranque va de 5 a 7 veces la nominal. Su deslizamiento a plena carga es menor del 5% y en los motores de gran tamaño, aproximadamente del 2%.

Tiene un solo devanado de jaula de ardilla de baja resistencia, que se instala en ranuras profundas, lo cual se traduce en un arranque rápido. Para motores de 10 HP o mayores, las corrientes de arranque suelen ser muy elevadas lo que implica la utilización de métodos de arranque a tensión reducida. Sus aplicaciones son generales: bombas centrifugas, ventiladores, grupo motor generador y equipos que requieren un par de arranque bajo.

3.4.2. CLASE B.

Este diseño proporciona pares y deslizamientos similares a los de la clase anterior, pero las corrientes en el arranque suelen ser menores, de 4 a 5 veces la nominal. Esta característica se consigue, por medio, de un devanado de rotor especial del tipo de doble jaula de ardilla o de barras profundas, como en los de clase A. como los anteriores a ciertas potencias no se prestan para el arranque a la tensión plena de la red. Este diseño es el más común para uso

general en tamaños que van de los 5 a los 200 HP, cuando los requerimientos del par de arranque no son muy severos.



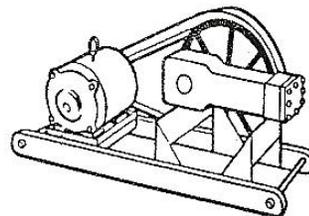
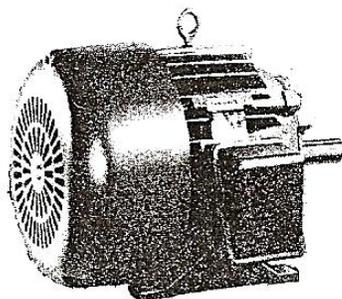
EMPLEADO EN BOMBAS CENTRIFUGAS
VENTILADORES, PERFORADORAS Y
TORNOS

Motor jaula de ardilla clase "B"

Figura. 3.4.2.

3.4.3. CLASE C.

Este es un diseño de par de arranque elevado y baja corriente de arranque, su rotor es de doble jaula de ardilla, que si bien proporciona las características mencionadas, limita su capacidad de disipación térmica. Por esto, no son recomendados para cargas de alta inercia que impidan su rápida aceleración. Su corriente de arranque es de 4.5 a 5 veces la nominal, su par de arranque del orden de 250% del régimen y su deslizamiento a plena carga es del 5% o menos. Entre sus aplicaciones más comunes se tienen: compresores, transformadores, maquinas trituradoras y toda clase de cargas de naturaleza estática y con requerimientos de alto par de arranque. Se fabrican de capacidad de 3 o mayores.



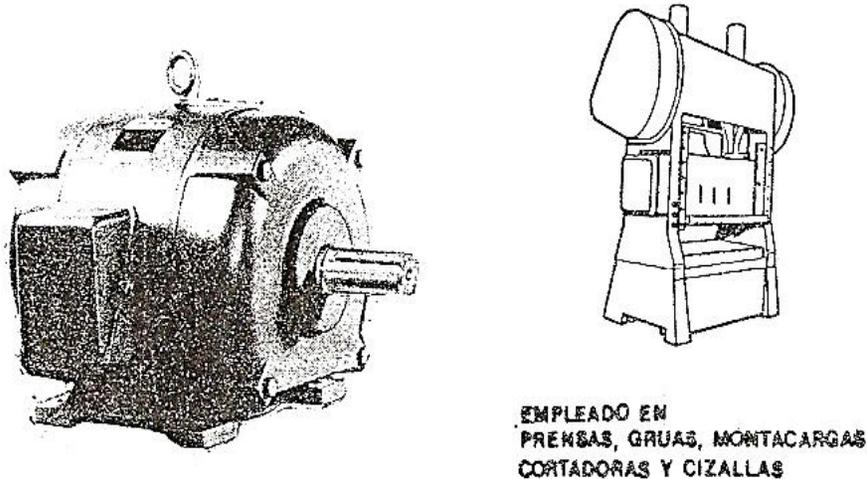
EMPLEADO EN BOMBAS RECIPROCAS
COMPRESORES, QUEBRADORAS Y
CARGADORES

Motor jaula de ardilla clase "C"

Figura. 3.4.3.

3.4.4. CLASE D.

Son motores con ranuras en el estator reducidas y a poca distancia de la superficie. Esto trae consigo alta resistencia, desarrollándose elevados pares de arranque, hasta 300% del nominal, pero con rendimientos bajos. Además, tienden a sobrecalentarse con cargas de alta inercia. Se usa con cargas intermitentes, con frecuentes inversiones de giro que requieren aceleraciones rápidas. Los motores con deslizamientos mayores, tales como los que se usan en los servicios de los elevadores, tienen deslizamiento entre 15 y 25 %.



Motor jaula de ardilla clase "D"

Figura. 3.4.4.

3.4.5. CLASE E Y F.

Los motores de clase E, son de bajo par de arranque, 130% del nominal, baja corriente de arranque de 2 a 4 veces la nominal y bajo deslizamiento, alrededor del 2%. Se construyen con doble jaula de ardilla, proporcionando rendimientos más bien modestos, aunque su consumo de energía es pequeño. Se utiliza para mover cargas ligeras como las de los motores de clase A y B. La clase F, es similar a la clase E, pero requiere menos corriente de arranque y presta un deslizamiento mayor.

3.5. MOTOR TRIFASICO ROTOR DEVANADO.

El rotor bobinado está compuesto de un devanado polifásico similar al del estator y con el mismo número de polos que él. Los terminales del devanado del rotor se conectan a anillos rozantes aislados, montados sobre el eje, en los que se apoyan escobillas de carbón, de manera que dichos terminales resultan accesibles desde el exterior, según se aprecia en la figura 3.5.1.

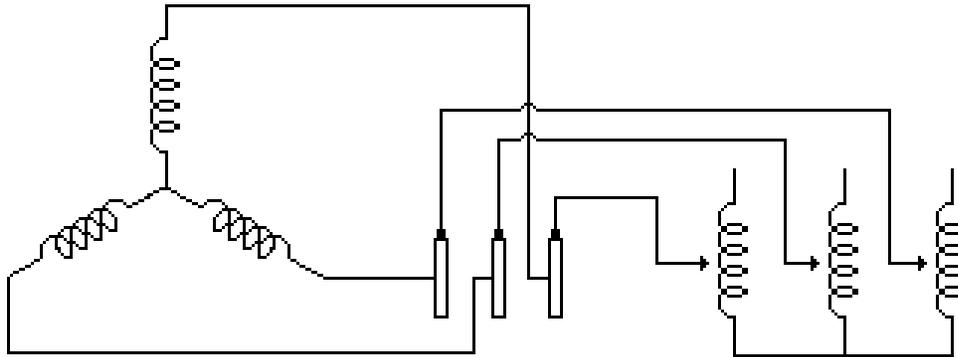
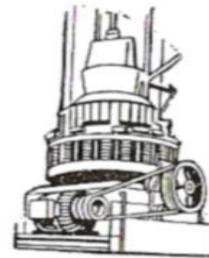
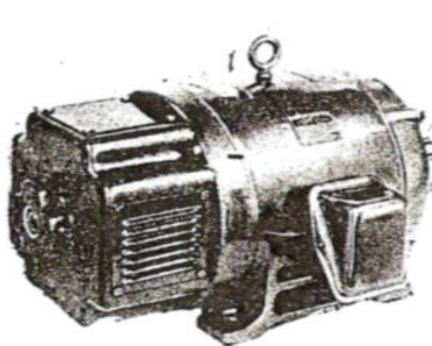


Figura. 3.5.1. Rotor bobinado.

Sus devanados del rotor pueden ser conectados a un grupo de resistencias exteriores y a otros circuitos de mando, lográndose con esto:

- a) Ajustar el par de aceleración.
- b) Controlar la velocidad.



EMPLEADO EN TRITURADORAS
ROLADORAS, TRANSPORTADORES
Y MONTACARGAS

Motor de rotor bobinado

Figura. 3.5.2.

tipo	Par de arranque (% del nominal)	Corriente de arranque (% del nominal)	Deslizamiento (%)	Factor de potencia (%)	Rendimiento (%)	observaciones
Clase A	110-150	500-700	2 - 5	87-89	87-89	De par de arranque normal. Aplicado en cargas de velocidad constante y en donde se tolera una corriente elevada durante el arranque. Sus usos son generales: bombas centrifugas, ventiladores, maquinas herramientas, etc.
Clase B	110-150	400-500	2 - 5	80-85	87-89	Con características similares a las de los motores de clase A, pero con una corriente de arranque menor. Se aplica cuando los requerimientos del par no son muy severos.
Clase C	200-250	450-500	3 - 5	80-85	82-84	De par de arranque elevado. Su rotor es del tipo de doble jaula de ardilla. Se aplica en el accionamiento de: bombas de movimiento alternativo, trituradores, compresores, etc.
Clase D	250-300	400-800	8 - 20	55-65	60-70	Tienen el par de arranque más elevado. Utilizados en cargas de alta inercia y cargas intermitentes. Sus usos se encuentran en: cortadoras, cizallas, punzadoras, ascensores, montacargas, etc.
Clase E Y F	50-130	200-400	1- 3.5	85-89	87-89	De bajo par de arranque. Utilizados con cargas de baja inercia acopladas directamente como en: ventiladores, bombas centrifugas, etc.
Rotor devanado	300	150	3 - 50	87-89	87-89	De alto par de arranque con baja corriente. Su eficiencia baja cuando se emplea con resistencia en el rotor para el control de la velocidad. Se aplica en accionamientos en donde la carga se debe acelerar lentamente. Algunas de sus aplicaciones se tienen en: grúas, montacargas, transportadores, etc.

Tabla. 3.5.3. Características eléctricas de los motores de inducción.

3.6. MOTORES MONOFASICOS DE INDUCCION.

Cuando están en operación este tipo de motores de inducción desarrollan un campo magnético rotatorio, pero antes de que el rotor inicie la rotación, el estator produce solo un campo estacionario pulsante.

Para producir un campo rotatorio y, por lo tanto, un par de arranque se debe tener un devanado auxiliar desfasado 90° con respecto al devanado principal. Una vez que el motor ha arrancado, el devanado auxiliar se remueve del circuito.

Los tipos de motores monofásicos son:

3.6.1. MOTORES DE FASE PARTIDA:

En general consta de una carcasa, un estator formado por laminaciones, en cuyas ranuras aloja las bobinas de los devanados principal y auxiliar, un rotor formado por conductores a base de barras de cobre o aluminio embebidas en el rotor y conectados por medio de anillos de cobre en ambos extremos, denominado lo que se conoce como una jaula de ardilla. Este tipo de motor tiene dos devanados bien diferenciados, un devanado principal y otro devanado auxiliar. El devanado auxiliar es el que provoca el arranque del motor, gracias a que desfasa un flujo magnético respecto al flujo del devanado principal, de esta manera, logra tener dos fases en el momento del arranque. Al tener el devanado auxiliar la corriente desfasada respecto a la corriente principal, se genera un campo magnético que facilita el giro del rotor. Cuando la velocidad alcanza un 75 % de sincronismo, el devanado auxiliar se desconecta gracias a un interruptor centrífugo que llevan incorporados estos motores de serie, lo cual hace que el motor solo funcione con el devanado principal.

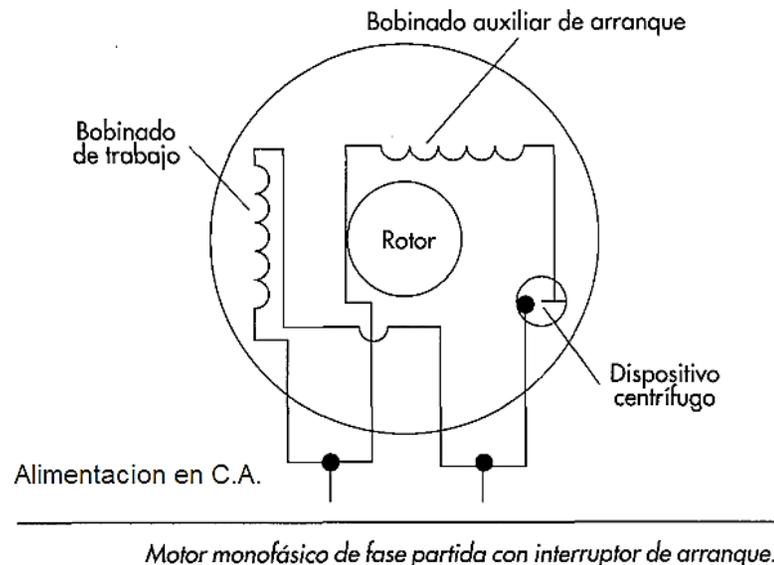


Figura. 3.6.1.1.

Se desactiva el switch centrífugo al alcanzar el 75% al 80% de su velocidad nominal.

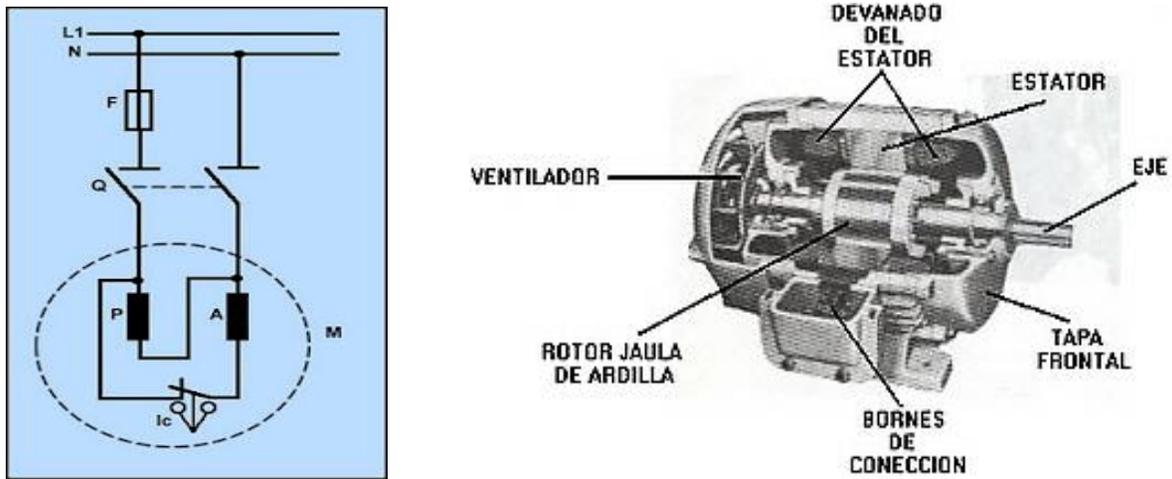


Figura 3.6.1.2.

3.6.2. MOTORES DE ARRANQUE CON CAPACITOR:

Este motor es similar en su construcción al de fase partida, excepto que se conecta un capacitor en serie con su devanado de arranque. Los motores de arranque con capacitor están equipados también como los de fase partida, con devanado de trabajo y arranque, pero el motor tiene un condensador (capacitor), que permite tener mayor par de arranque. El capacitor se conecta en serie con el devanado de arranque y el switch o interruptor centrífugo.

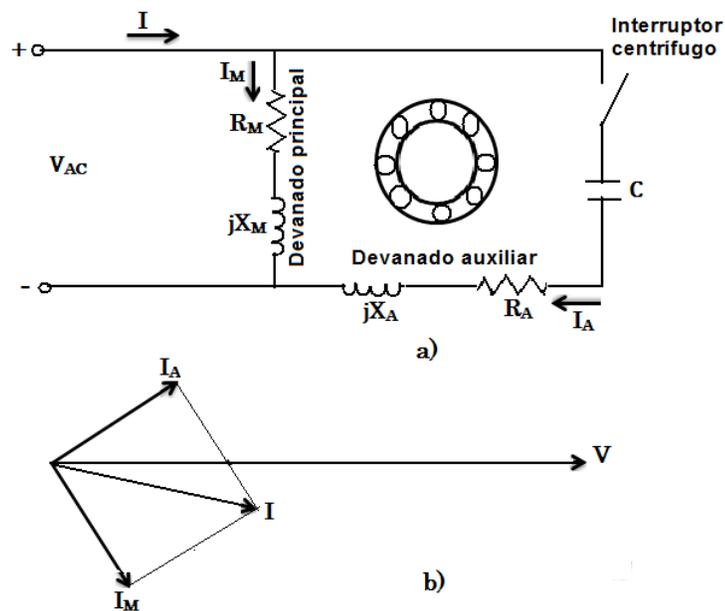


Figura. 3.6.2.1. Motor de arranque por capacitor (a) esquemático (b) desfase de corrientes.

3.6.3. MOTORES CON CAPACITOR PERMANENTE:

Este motor Utiliza un capacitor conectado en serie con los devanados de arranque y de trabajo. El crea un retraso en el devanado de arranque, el cual es necesario para arrancar el motor y para accionar la carga. La principal diferencia entre un motor con permanente y un motor de arranque con capacitor, es que no se requiere switch centrífugo. Éstos motores no pueden arrancar y accionar cargas que requieren un alto par de arranque.

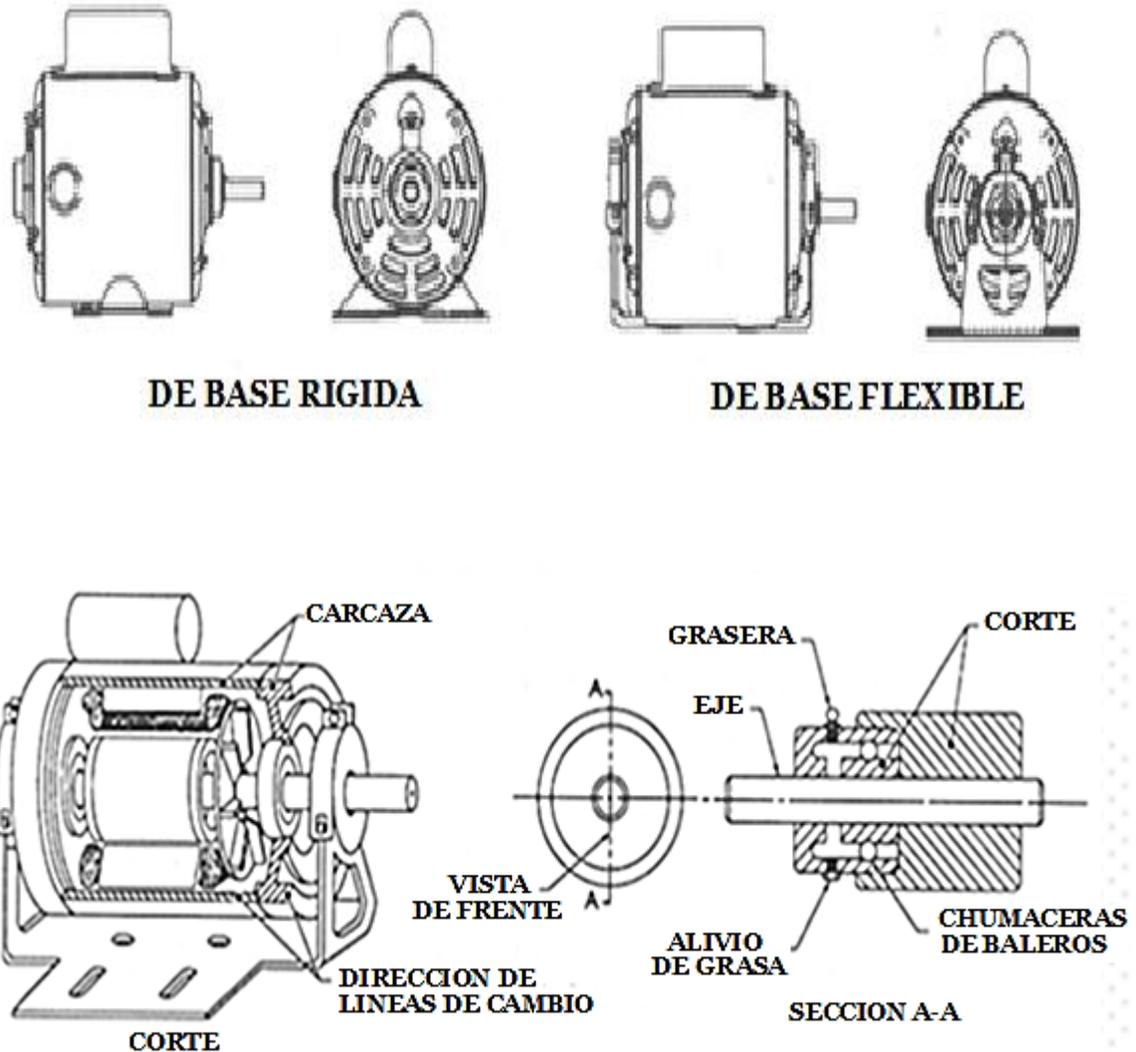


Figura. 3.6.3.1.

3.6.4. MOTORES DE INDUCCION REPULSION:

Los motores de inducción-repulsión se aplican donde se requiere arrancar cargas pesadas sin demandar demasiada corriente es que en el motor a inducción el rotor no es un imán permanente sino que es un electroimán. Tiene barras de conducción en todo su largo, incrustadas en ranuras a distancias uniformes alrededor de la periferia. Las barras están conectadas con anillos (en cortocircuito como dicen los electricistas) a cada extremidad del rotor. Están soldadas a las extremidades de las barras. Este ensamblado se parece a las

pequeñas jaulas rotativas para ejercer a mascotas como hámsteres y por eso a veces se llama "jaula de ardillas", y los motores de inducción se llaman motores de jaula de ardilla.

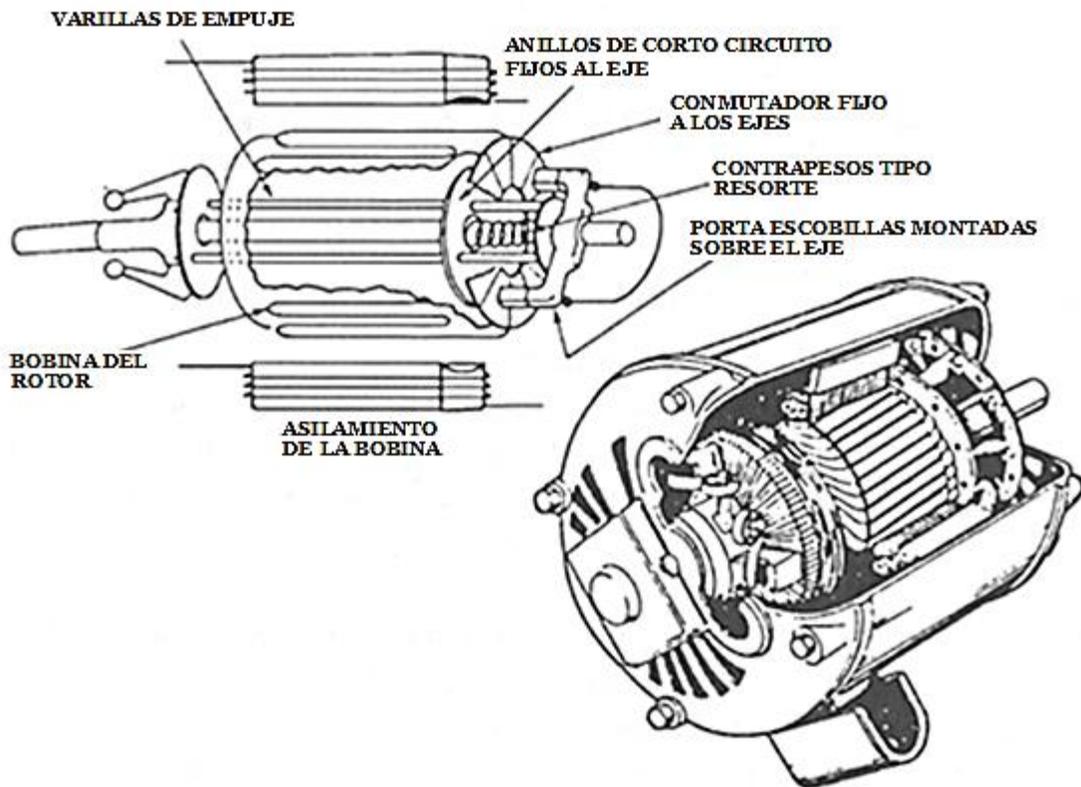


Figura. 3.6.4.1.

3.6.5. MOTORES DE POLOS SOMBREADOS:

Este tipo de motores es usado en casos específicos, que tienen requerimientos de potencia muy bajos. Su rango de potencia está comprendido en valores desde 0.0007 HP hasta 1/4 HP, y la mayoría se fabrica en el rango de 1/100 a 1/20 de HP. La principal ventaja de estos motores es su simplicidad de construcción, su confiabilidad y su robustez, además, tienen un bajo costo. A diferencia de otros motores monofásicos de C.A., los motores de fase partida no requieren de partes auxiliares (capacitores, escobillas, conmutadores, etc.) o partes móviles (switches centrífugos). Esto hace que su mantenimiento sea mínimo y relativamente sencillo.

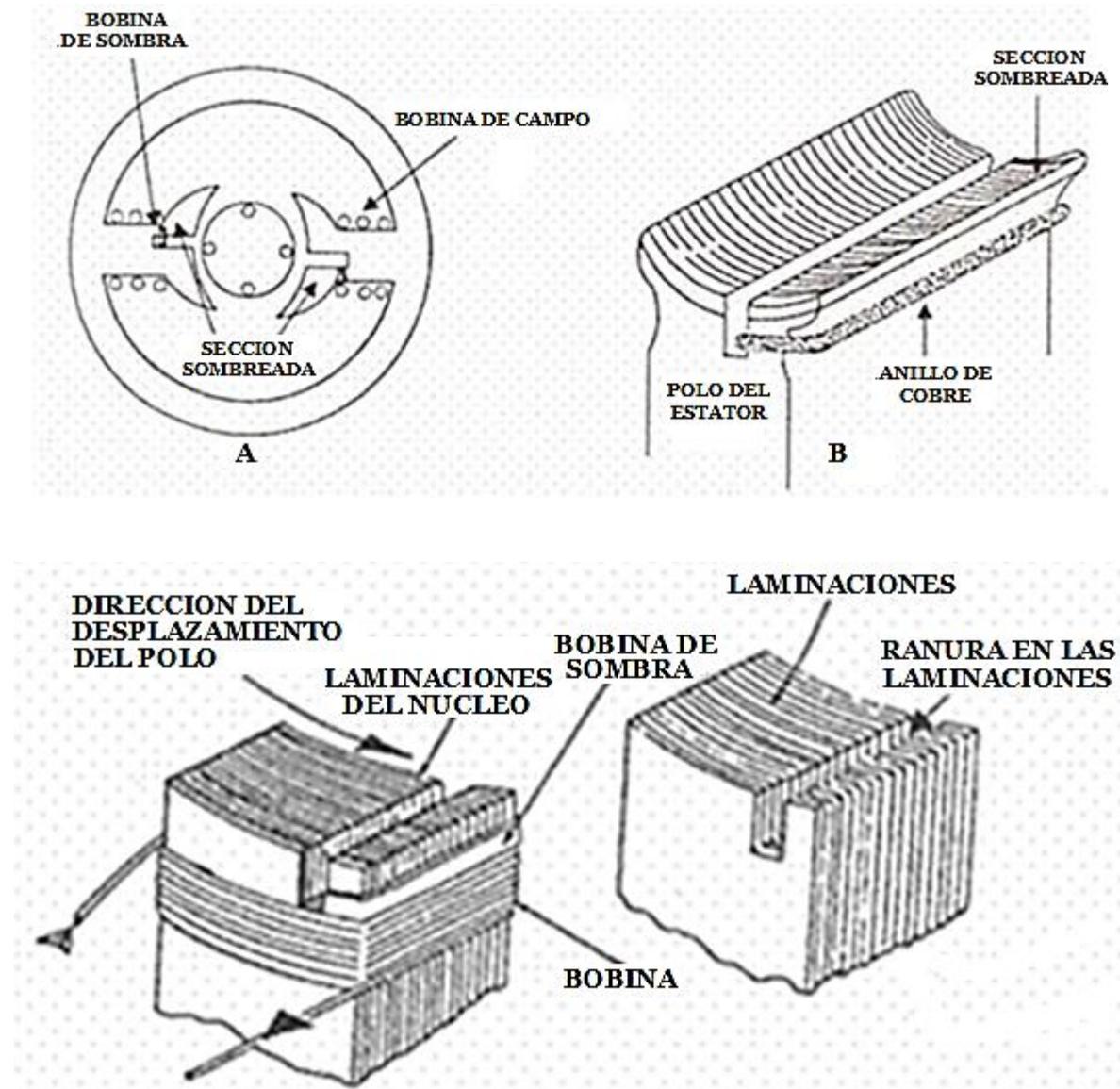
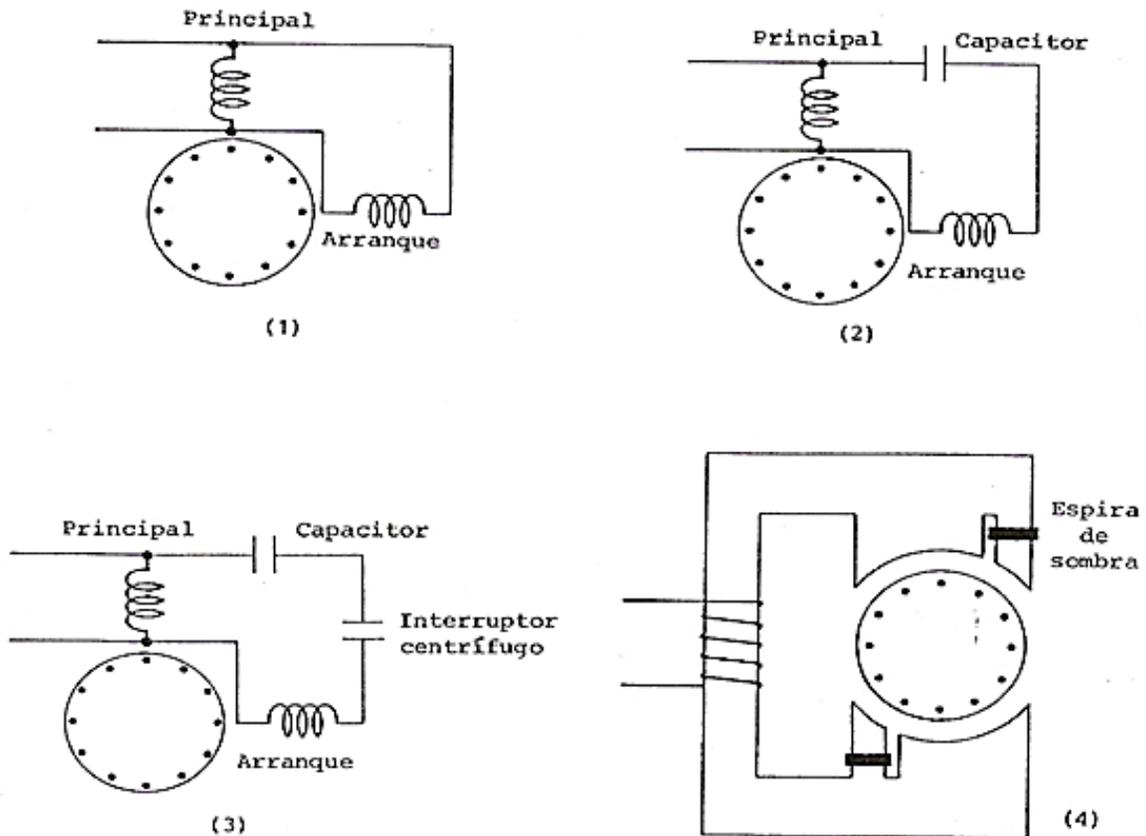


Figura. 3.6.5.1.

Estos motores se usan en máquinas, herramientas, ventiladores, bombas, lavadoras, secadoras y una gran variedad de aplicaciones la mayoría de ellos se fabrican en el rango de $\frac{1}{30}$ (24.9w) a $\frac{1}{2}$ hp (373w).

OPERACIÓN:

- Devanado de trabajo o devanado principal.
- Devanado auxiliar o de arranque.



MOTORES MONOFASICOS. (1) CON DEVANADO AUXILIAR DE ARRANQUE (2) CON CAPASITOR EN EL DEVANADO AUXILIAR DE ARRANQUE (3) CON CAPASITOR E INTERRUPTOR CENTRÍFUGO EN EL DEVANADO AUXILIAR DE ARRANQUE (4) CON POLOS SOMBREADOS.

Figuras. 3.6.6. Circuitos equivalentes de los motores monofásicos.

Se ha encontrado que la bobina auxiliar es excelente para el arranque, pero a plena carga produce mayor deslizamiento que con la sola bobina principal, reduciendo la potencia aprovechable y la eficiencia del motor. Una solución a este problema es la adición de un interruptor centrífugo en el circuito de la bobina auxiliar, de tal manera que cuando el motor alcanza aproximadamente en 75% de su velocidad de trabajo, el mecanismo centrífugo abre el interruptor y saca de operación la bobina auxiliar.

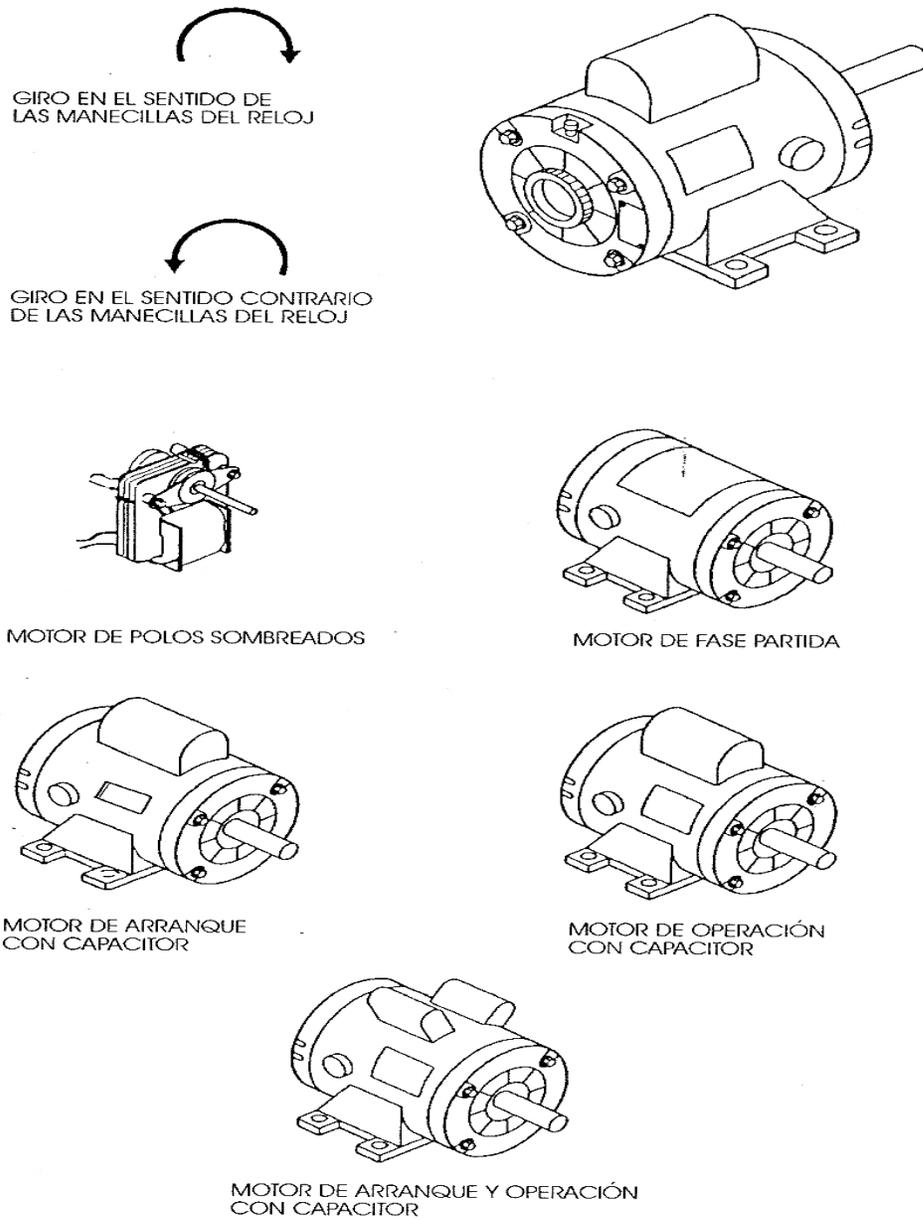


Figura. 3.6.7. Tipos de motores monofásicos.

Motores Asíncronos				Características Eléctricas				
Red 230/400V 50Hz								
IP55 4 polos	Potencia nominal	Velocidad Nominal	Intensidad Nominal	f.d.p.	Rendimiento	I arranque / I nominal	C arranque/ C nominal	Momento de inercia
TIPO	P_n Kw	V_n rpm	I_n A	$\cos \varphi$	η	I_a/I_n	C_a/C_n	J Kg.m ²
LS56L	0,09	1370	0,43	0,7	55	2,9	2	0,0025
LS63E	0,12	1375	0,56	0,77	56	3	2,2	0,0035
LS63E	0,18	1410	0,75	0,75	63	3,7	2,3	0,0048
LS71L	0,25	1435	0,93	0,74	70	4,6	2,3	0,0067
LS71L	0,37	1425	1,4	0,7	70	4,4	2,3	0,0085
LS71L	0,55	1390	2,2	0,75	66	3,7	1,9	0,011
LS80L	0,55	1400	2,1	0,74	68	4,4	2,1	0,013
LS80L	0,75	1400	2,85	0,77	69	4,5	2,4	0,018
LS80L	0,9	1425	3,2	0,73	73	5,7	2,6	0,024
LS90S	1,1	1415	3,85	0,79	75	5,2	2,1	0,032
LS90L	1,5	1420	5	0,79	78	5,9	2,8	0,039
LS90L	1,8	1410	6	0,82	79	5,7	2,5	0,049
LS100L	2,2	1430	7,7	0,81	75	5,3	1,9	0,039
LS100L	3	1420	10,2	0,78	77	5,1	2,3	0,051

d_{rotor}	[m]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
n_s	[rpm/min]	3000	3000	1500	1500	1000	1000
n_r	[rpm/min]	2860	2920	1470	1475	985	990
T_e	[Nm]	12,5	142	840	2300	5020	9500
P_{as}	[kW]	3,63	42,6	126,7	348	510	970
η	[-]	0,749	0,875	0,911	0,930	0,901	0,938

Figura. 3.6.8. Tablas de características eléctricas en los motores asíncronos.

3.7. MOTOR UNIVERSAL.

Las partes de un motor universal son la carcasa, el estator y el rotor o inducido. La carcasa generalmente de acero o de aluminio, tiene el tamaño necesario para mantener firmes las piezas del estator. Muchas veces no existe la carcasa como tal, puesto que el lugar de la herramienta al que va fijo el estator hace las veces de carcasa.

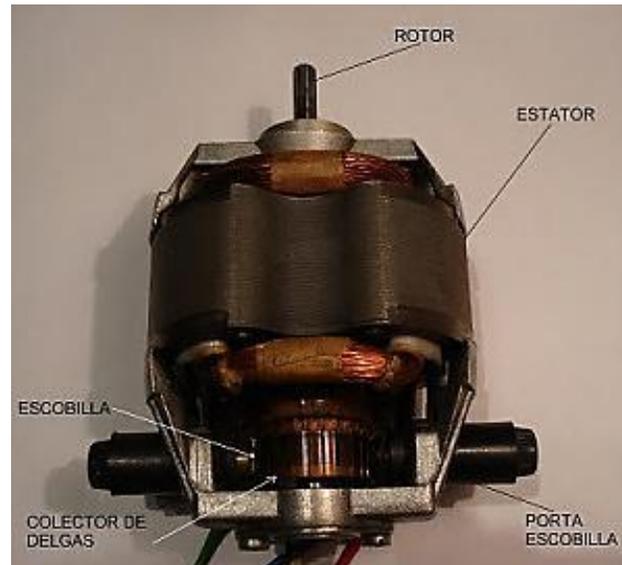


Figura. 3.7.1. Motor universal.

El estator o inducido consiste en un paquete de láminas circulares prensadas, fijadas con remaches, que en su interior tienen unos polos salientes con forma necesaria para recibir, generalmente, un solo par de bobinas inductoras.

El rotor, también llamado inducido en estos motores, consiste en un paquete de láminas de acero que forman el núcleo, con unas ranuras en las que se alojan varias bobinas, cuyos extremos van soldados a un colector.

El colector es una pieza circular, montada en el eje, hecha con numerosas láminas de cobre, llamadas delgas, aisladas unas de otras con una mica intermedia generalmente más baja que las delgas y aisladas también del eje.

Sobre el colector, cuya superficie es completamente lisa, van unas portaescobillas con sus respectivas escobillas de carbón o carbones, que permiten la conexión eléctrica en serie con el rotor o inducido que gira.

Características del motor universal:

1. Funciona con corriente alterna y con corriente directa.
2. Posee un par de arranque muy elevado.
3. La velocidad es directamente proporcional a la corriente.
4. Se utiliza en herramientas manuales, electrodomésticos.
5. Para invertir el sentido de rotación, se invierte el sentido de la corriente en cualquiera de los bobinados.

Principio de funcionamiento del motor eléctrico universal.

El motor eléctrico universal basa su funcionamiento en la ley de Laplace. El bobinado inductor y el bobinado inducido están conectados en serie.

Al ser recorridos por una corriente, el bobinado inductor forma el campo magnético y el inducido por la ley de Laplace, al ser recorrido por la corriente y sometido a la influencia del campo magnético inductor, se desplaza, dando origen al giro del rotor.

Si aumenta el campo aumenta la fuerza, aumenta la velocidad. El campo magnético que produce la bobina inducida, provoca una deformación del flujo inductor llamada reacción del inducido.

En Corriente alterna (CA) o en corriente directa (CD) el sentido se mantiene por la acción momentánea de cada alternancia en particular. En CA produce una f.c.e.m. (fuerza contra electromotriz) por efecto transformador y por efecto generador. En CD sólo por efecto generador.

Es similar a la de un motor serie de corriente continua, aunque con muchas y variadas modificaciones:

-Los núcleos polares, y todo el circuito magnético, están contruidos con chapas de hierro al silicio aisladas y apiladas para reducir la pérdidas de energía por corrientes parásitas que se producen a causa de las variaciones del flujo magnético cuando se conecta a una red de corriente alterna.

-Menor número de espiras en el inductor con el fin de no saturar magnéticamente su núcleo y disminuir así las pérdidas por corrientes de Foucault y por histéresis, aumentar la intensidad de corriente y, por lo tanto, el par motor y mejorar el factor de potencia.

-Mayor número de espiras en el inducido para compensar la disminución del flujo debido al menor número de espiras del inductor.

Características de funcionamiento:

-En corriente continua es un motor serie normal con sus mismas características.

Máquinas eléctricas.

-En corriente alterna se comporta de manera semejante a un motor serie de corriente continua. Como cada vez que se invierte el sentido de la corriente, lo hace tanto en el inductor como en el inducido, con lo que el par motor conserva su sentido.

-Menor potencia en corriente alterna que en continua, debido a que en alterna el par es pulsatorio. Además, la corriente está limitada por la impedancia, formada por el inductor y la resistencia del bobinado. Por lo tanto habrá una caída de tensión debido a la reactancia cuando funcione con corriente alterna, lo que se traducirá en una disminución del par.

-Mayor chispeo en las escobillas cuando funciona en corriente alterna, debido a que las bobinas del inducido están atravesadas por un flujo alterno cuando se ponen en cortocircuito por las escobillas, lo que obliga a poner un devanado compensador en los motores medianos para contrarrestar la fuerza electromotriz inducida por ese motivo.

Principio de Funcionamiento en Corriente Alterna:

Cuando el motor universal es conectado en ca, su flujo varía cada medio ciclo.

En la primera mitad de la onda de corriente alterna es denominada positiva, aquí la corriente en los devanados de la armadura tienen la dirección igual a las manecillas del reloj, es decir de izquierda a derecha, mientras que el flujo producto del devanado del campo tiene un sentido de derecha a izquierda, así que el par desarrollado por el motor es contrario al de las manecillas del reloj.

En la segunda mitad de la onda de corriente alterna, denominada negativa, el voltaje aplicado invierte su polaridad, así mismo la corriente cambia su dirección y ahora está de derecha a izquierda, también el flujo producto de los polos está dirigido ahora de izquierda a derecha, el par de arranque no cambia su dirección, puesto que en la mitad negativa se invierten tanto la dirección de la corriente, como la del flujo.

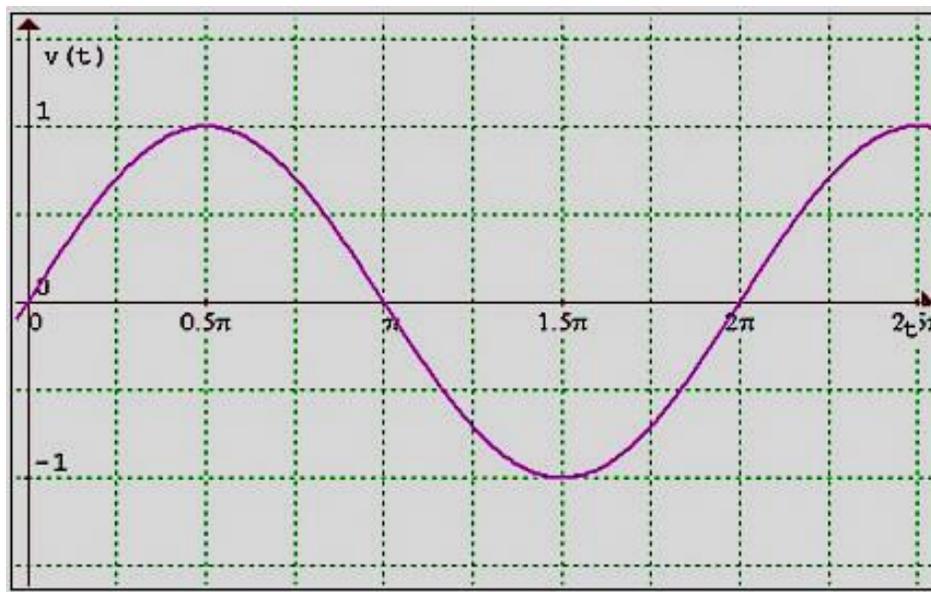


Figura. 3.7.2. Onda senoidal.

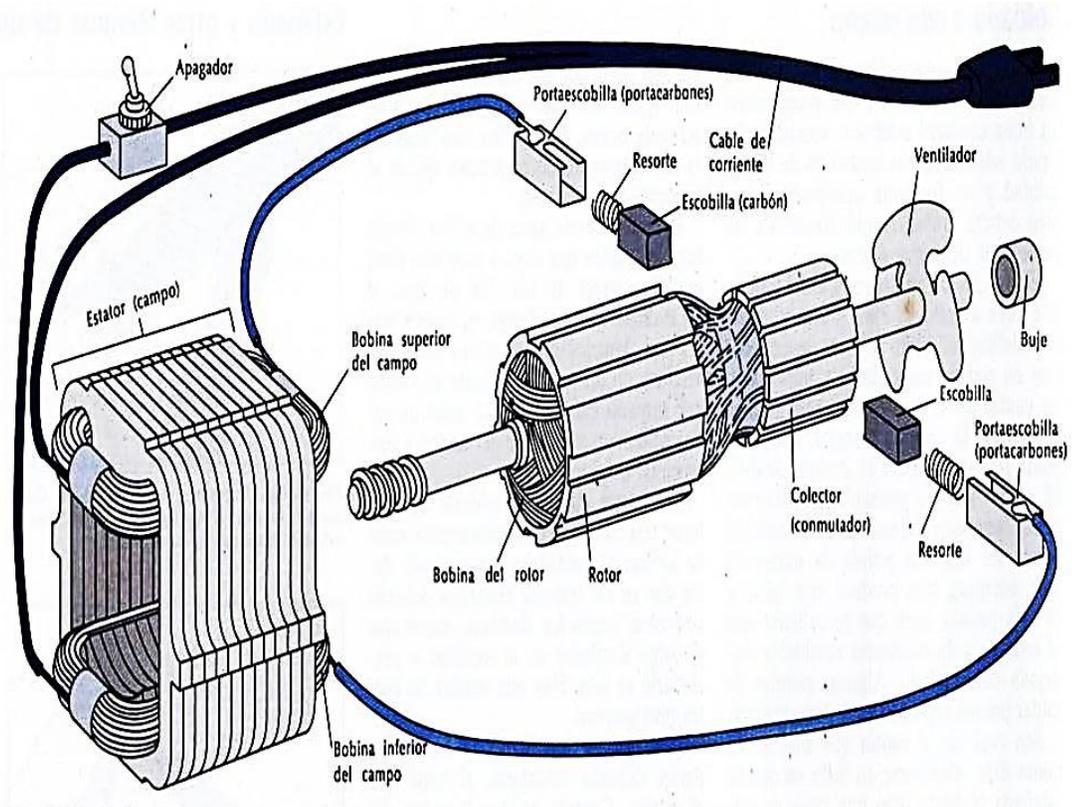


Figura. 3.7.3. Motor universal de corriente alterna.

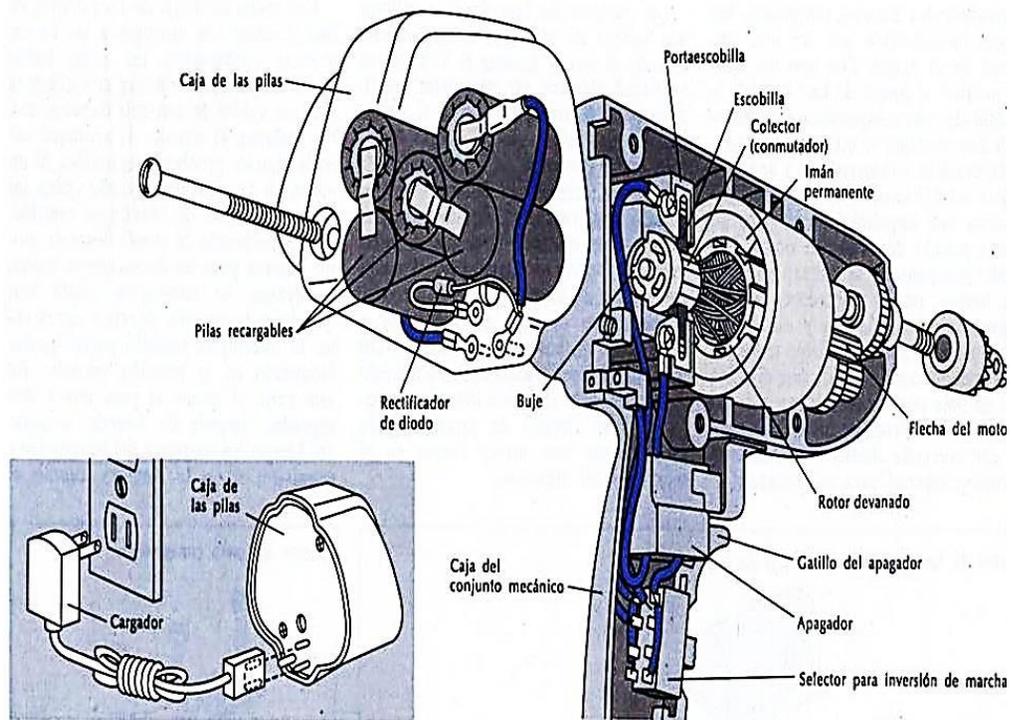


Figura. 3.7.4. Motor universal de corriente directa.

Usos:

El uso de estos motores en corriente alterna está muy extendido por el mayor par de arranque respecto al de los motores de inducción y por su elevada velocidad de rotación, lo que permite reducir su tamaño y su precio. Así, se emplea en máquinas herramientas portátiles de todo tipo, electrodomésticos pequeños, etc.

3.8. APLICACIONES.

Campos de aplicación de los motores asíncronos.

Características de la aplicación:	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6	Tipo 7
Tipo de carga	Constante	Variable	Constante	Variable	Variable	Variable	Variable
Arranques	Raramente	Raramente	Raramente	Raramente	Frecuente	Frecuente	Frecuente
Picos de carga	Bajos	Altos	Altos	Altos y frecuentes	Altos y de corta duración	Altos	Altos
Par de arranque	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal a alto	
Potencia del sistema	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Muy alto

Tabla 3.8.1: Aplicaciones de los motores de inducción.

Ejemplos de cada uno de los tipos son:

- Tipo 1: La mayoría de las aplicaciones: bombas centrífugas, ventiladores, compresores sin carga.
- Tipo 2: Máquinas herramienta: tornos, sierras, fresadoras, etc...
- Tipo 3: Compresores, bombas oscilantes, transportadores cargados.
- Tipo 4: Prensas punzadoras de alta velocidad.
- Tipo 5: Prensas de estirado, plegadoras.
- Tipo 6: Grúas, elevadores.
- Tipo 7: Extractores.

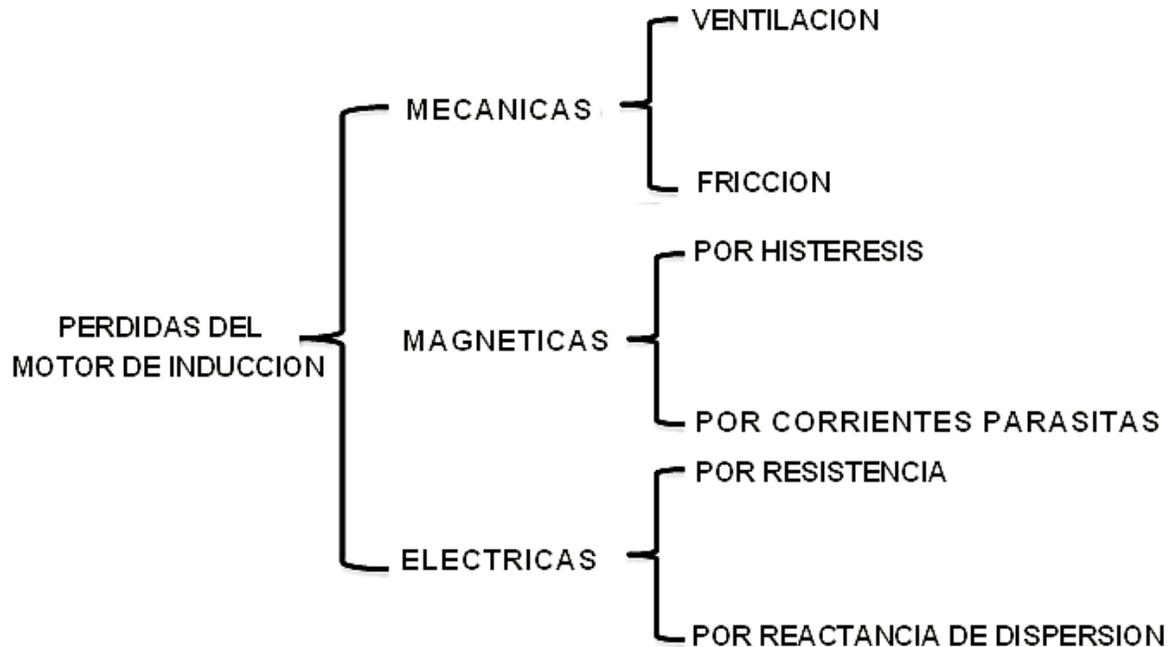
Añadir algunos ejemplos de motores que requieren una ejecución especial:

- Motores para servicios intermitentes empleados en mecanismos de elevación, cabrestantes, etc...Requieren gran robustez mecánica.
- Motores para telares. Tienen un funcionamiento cíclico rápido, la marcha es irregular y ruda, así que el motor debe ser excepcionalmente robusto.
- Motores para el accionamiento de la maquinaria de cubierta en los buques. El ambiente de trabajo es muy desfavorable, así que debe ponerse especial atención en el aislamiento.
- Motores para la industria láctea. La carcasa debe ser sin nervaduras y recubierta de un barniz especial que facilite la limpieza.
- Motores destinados a funcionamiento bajo el agua. Deben hacer frente al problema de funcionamiento en inmersión.
- Motores para servicio en atmósferas inflamables o explosivas. Son motores de "seguridad aumentada", con carcasa blindada para contener las posibles explosiones.
- Motores de varias velocidades, para aquellos procesos tecnológicos que no requieren una variación continua de la velocidad, sino únicamente varios niveles de velocidad diferente.

Máquinas eléctricas.

3.9. PERDIDAS EN LOS MOTORES*.

Las pérdidas se pueden clasificar según el siguiente cuadro:



Las pérdidas mecánicas se deben al giro del rotor. Tienen una componente debida a la fricción en los cojinetes y otra producida por la fuerza necesaria para desplazar el aire, cuando tienen ventilador integrado al rotor. Estas pérdidas están presentes aunque la máquina gire en vacío, y son constantes e independientes de la carga.

Las pérdidas magnéticas se deben al giro del flujo de estator, desplazándose en el núcleo de la máquina. Se producen de manera muy similar a como sucede en los transformadores, ya que ya se han descrito en el subtema 3.2.3(a), por lo que no se considera necesario repetirlo aquí.

Las pérdidas mecánicas y magnéticas tienen en común que están presentes ya sea en vacío o con carga, y son independientes de esta, por lo que se pueden representar por un solo circuito paralelo agregado a la entrada del motor ideal.

La resistencia r_{mhe} representa las pérdidas mecánicas, de histéresis y de corriente parasitas, y la reactancia X_m es para la corriente de magnetización.

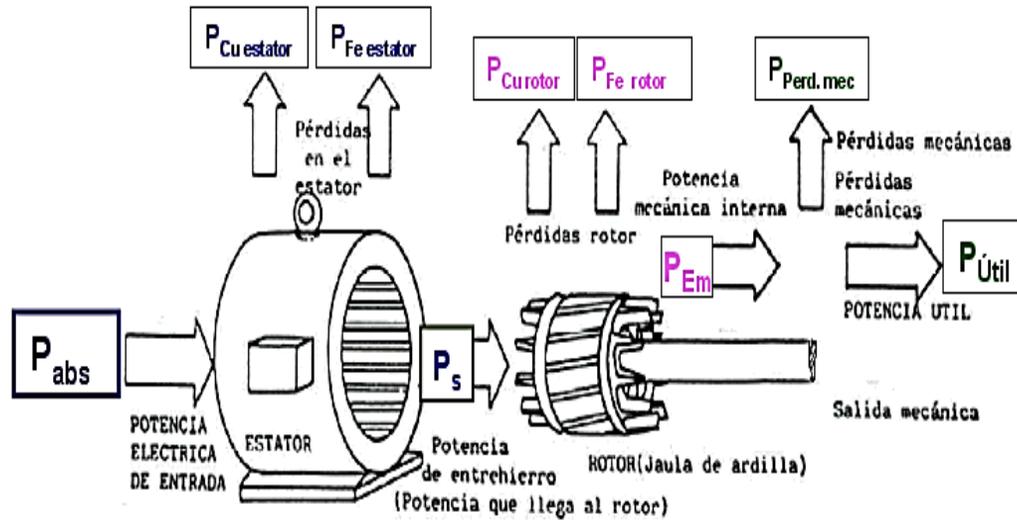
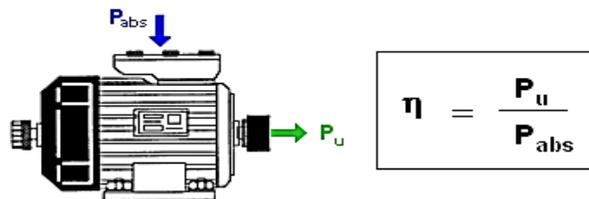


Figura. 3.9.1. Tipos de pérdidas en los motores.

Rendimiento



$$P_u = P_{abs} - P_{Cu\ est} - P_{Fe\ est} - P_{Cu\ rot} - P_{Perd\ méca}$$

Es interesante considerar el rendimiento del rotor:

$$\eta_{rotor} = \frac{P_{Em}}{P_s}$$

$$\eta_{rotor} = \frac{P_{Em}}{P_s} = \frac{P_s (1 - S)}{P_s}$$

$$\eta_r = 1 - S$$

El rendimiento de un motor asíncrono depende esencialmente del deslizamiento, el cual debe ser muy pequeño para que el rendimiento sea aceptable

Figura. 3.9.2. Rendimiento del motor.

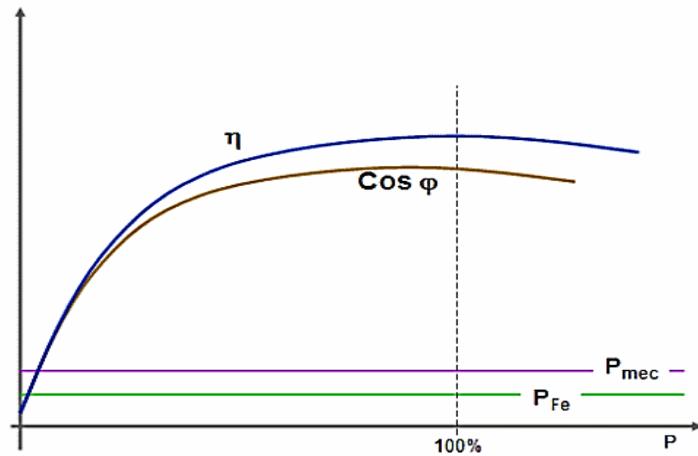
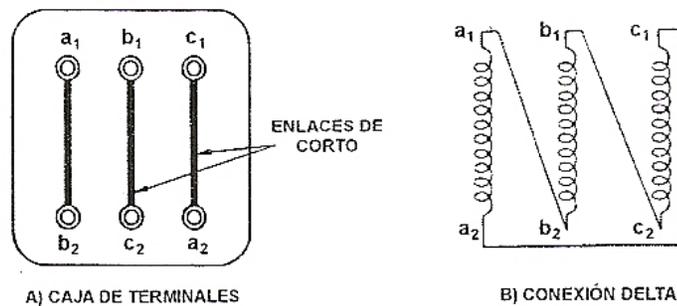


Figura. 3.9.3. Curva representativa del rendimiento de los motores.

3.10. TIPOS DE ARRANQUE DE MOTORES TRIFÁSICOS*.

IDENTIFICACION DE TERMINALES Y DIAGRAMA DE CONEXIONES.

Generalmente el diagrama de conexiones de las terminales de las terminales del motor está dado en el mismo. Para un motor trifásico se tienen conexiones de tres devanados como se muestra, indicados como: a_1 y a_2 , b_1 y b_2 y c_1 y c_2

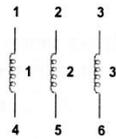


TERMINALES DENTRO DE UNA CAJA

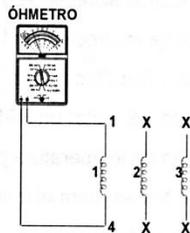
Figura. 3.10.1.

Los motores trifásicos de inducción pueden estar conectados en delta y estrella y pueden tener varias terminales, dependiendo de las conexiones para operar con distintos voltajes.

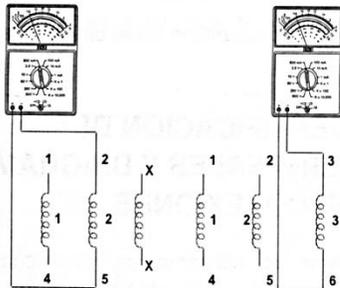
En las siguientes figuras, se muestran algunas de estas conexiones:



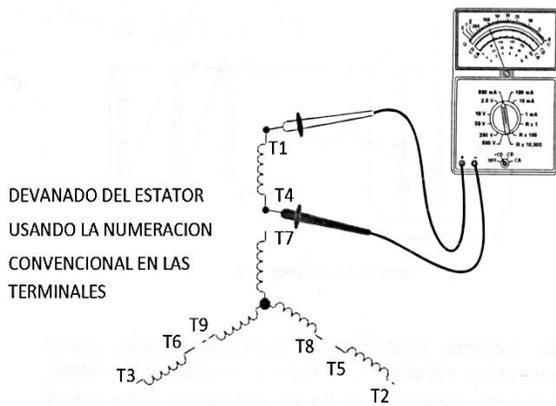
REPRESENTACIÓN DE LAS BOBINAS DE UN MOTOR TRIFÁSICO



IDENTIFICACIÓN DE LAS BOBINAS DE UN MOTOR TRIFÁSICO

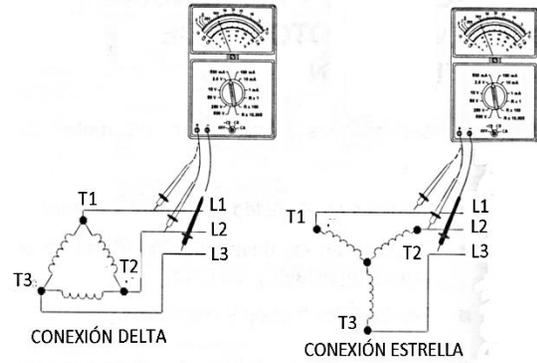


IDENTIFICACIÓN DE LAS BOBINAS DE UN MOTOR TRIFÁSICO



DEVANADO DEL ESTADOR
USANDO LA NUMERACION
CONVENCIONAL EN LAS
TERMINALES

VERIFICACIÓN DE LA CONTINUIDAD EN LAS TERMINALES DE
UNA CONEXIÓN ESTRELLA PARA MOTOR TRIFÁSICO



LA CONTINUIDAD DE LOS DEVANADOS INTERNOS
EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA
SE PUEDE PROBAR CON OHMETRO O UNA LÁMPARA DE PRUEBA

Figura. 3.10.2.

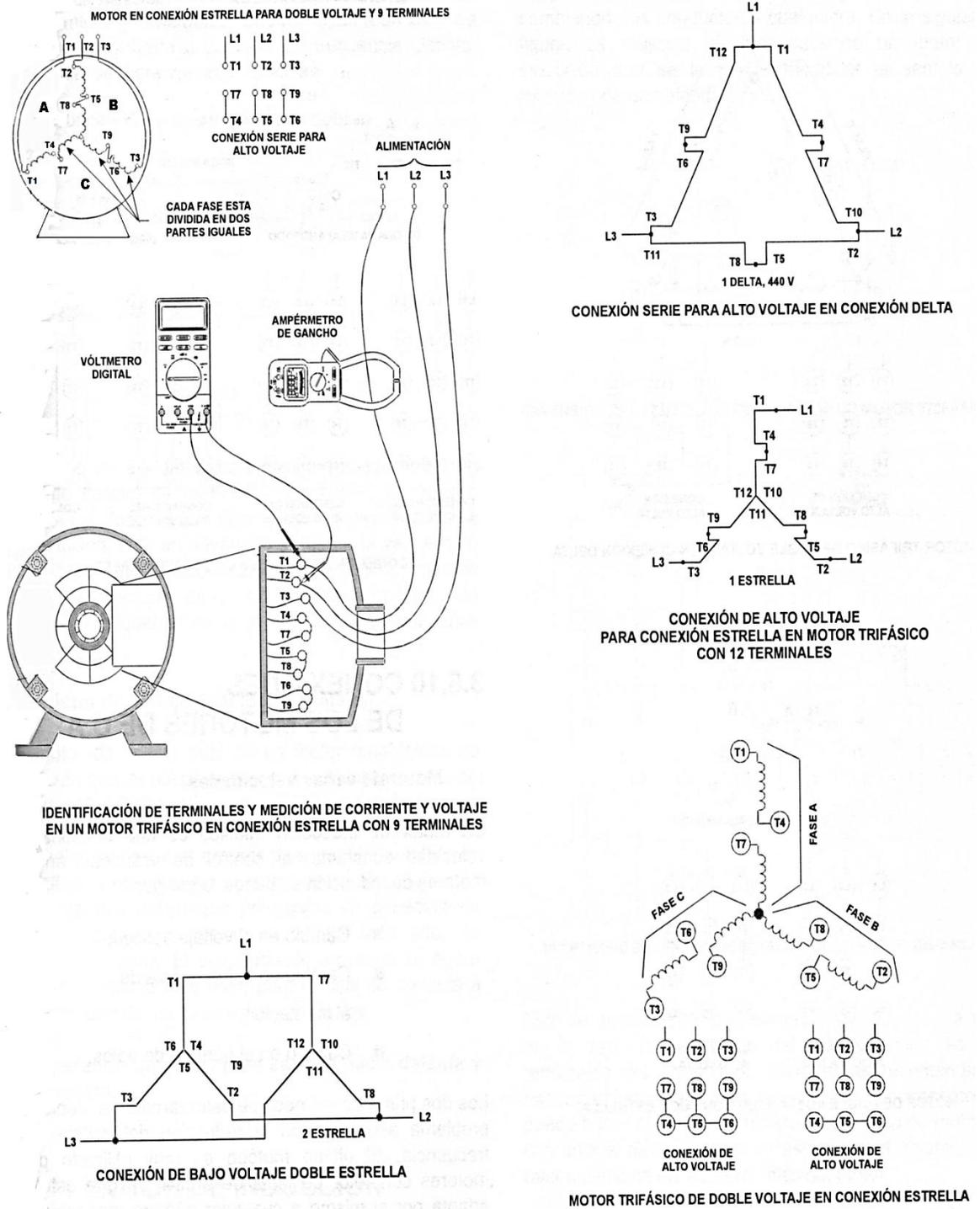


Figura. 3.10.3.

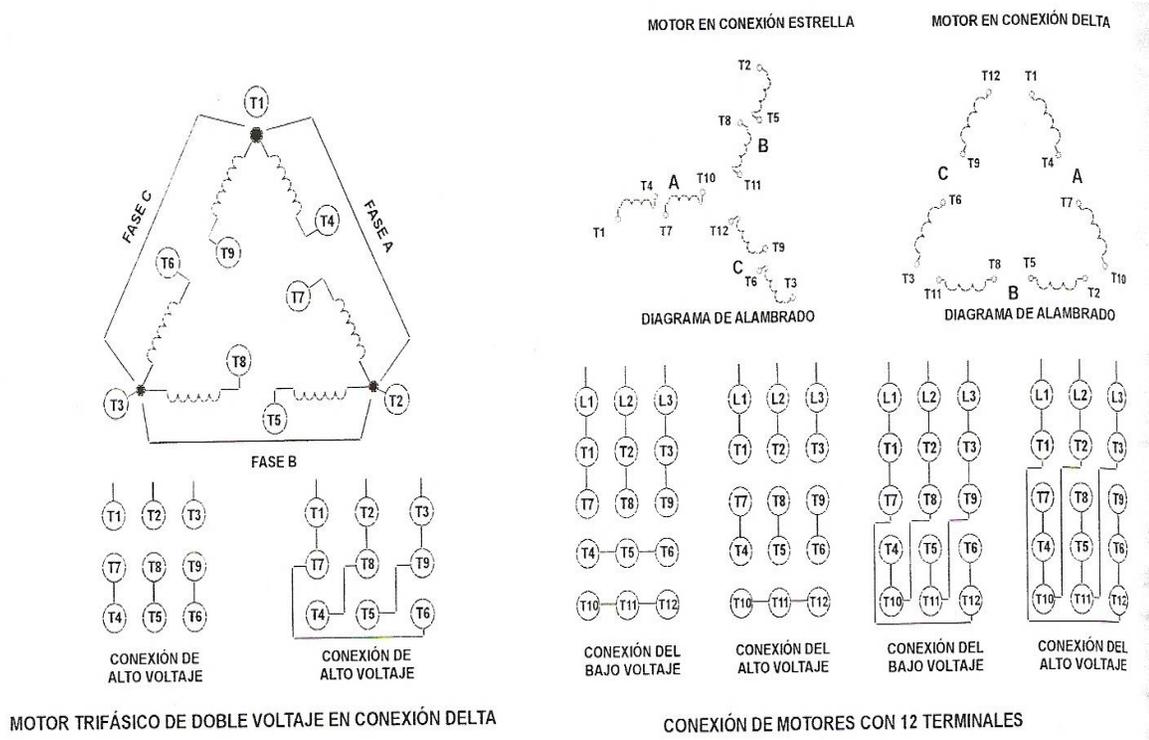


Figura. 3.10.4.

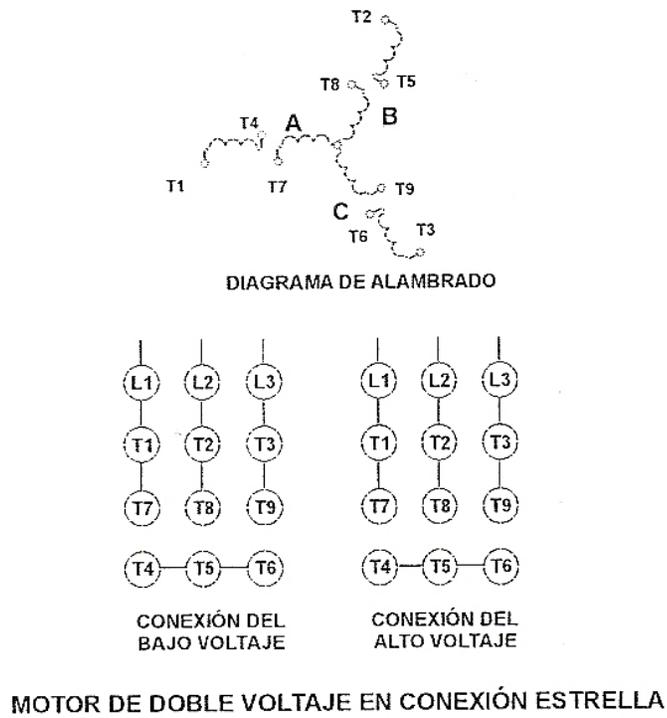


Figura. 3.10.5.

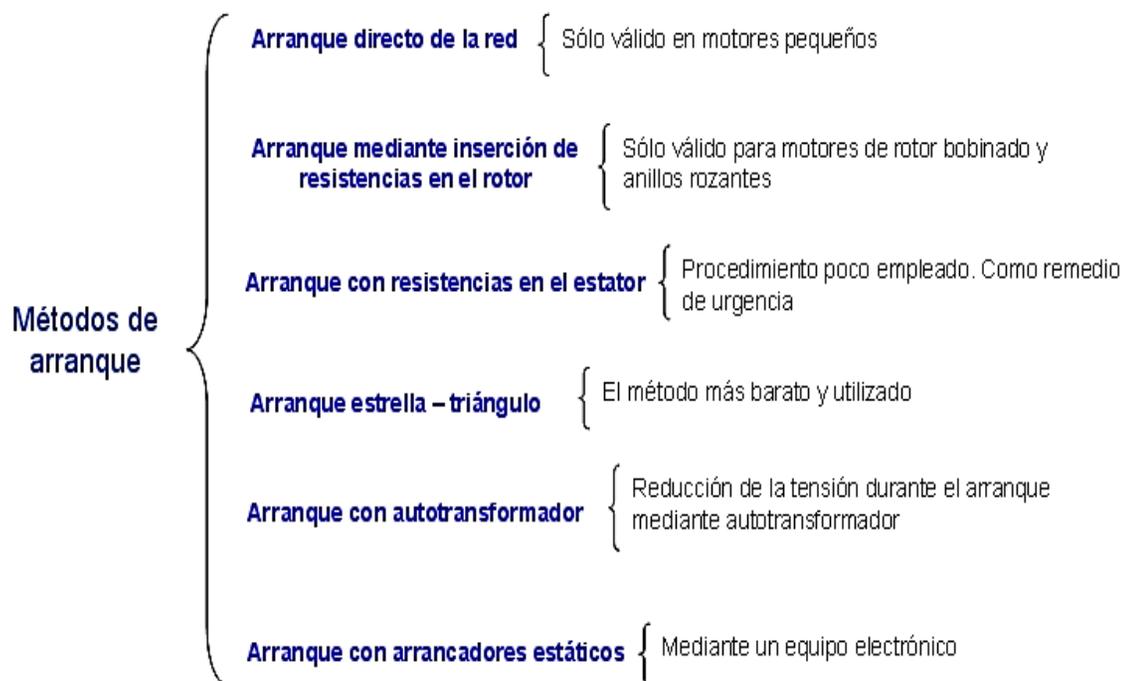


Figura. 3.10.6.

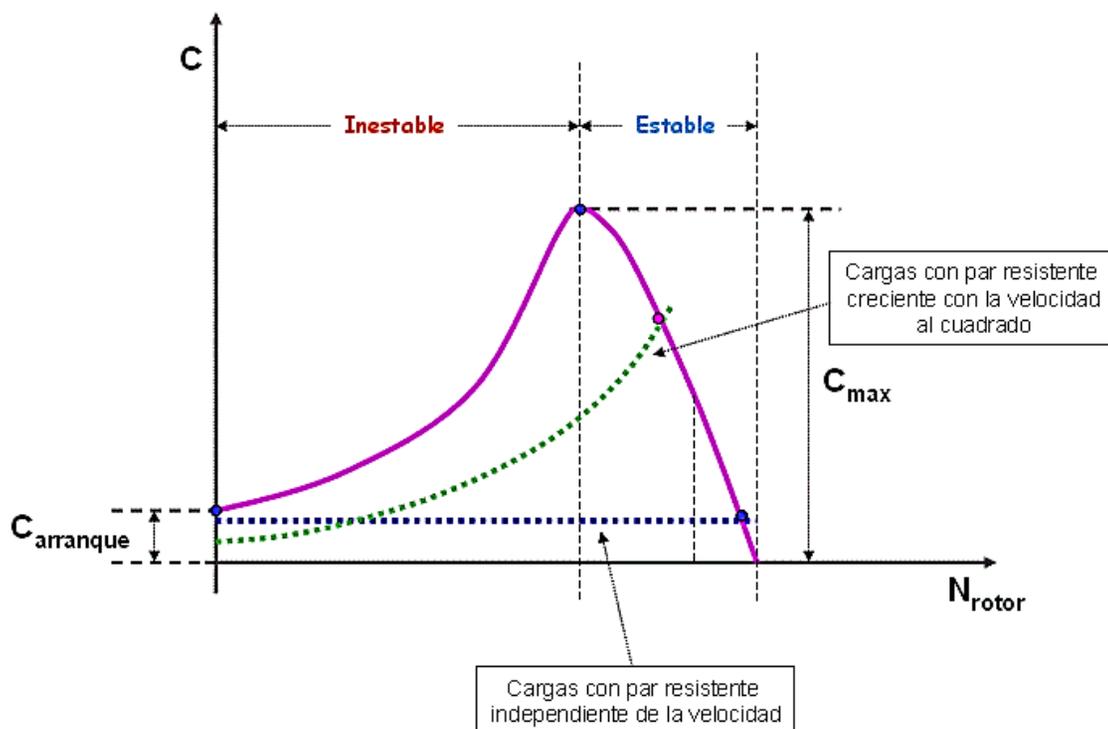


Figura. 3.10.7.

ARRANQUE DIRECTO:

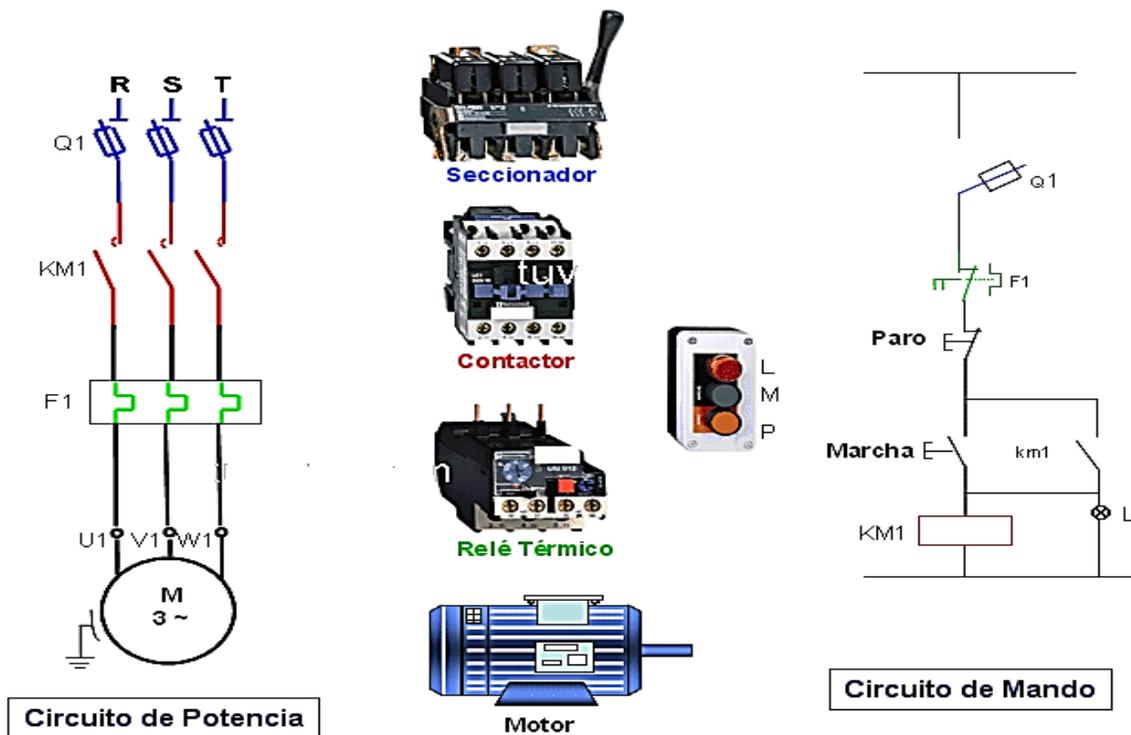


Figura. 3.10.8.

ARRANQUE ESTRELLA-TRIANGULO:

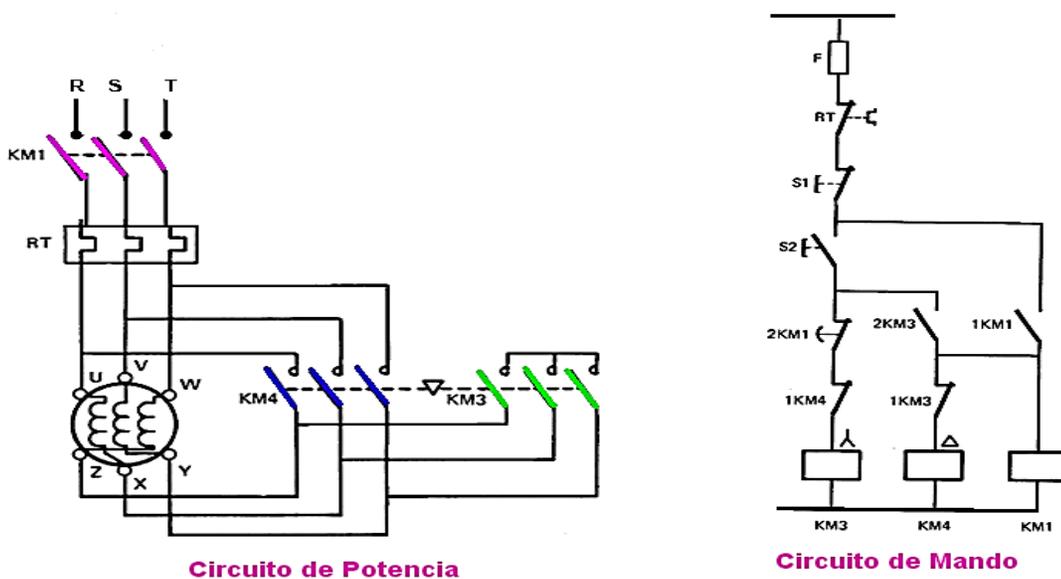


Figura. 3.10.9.

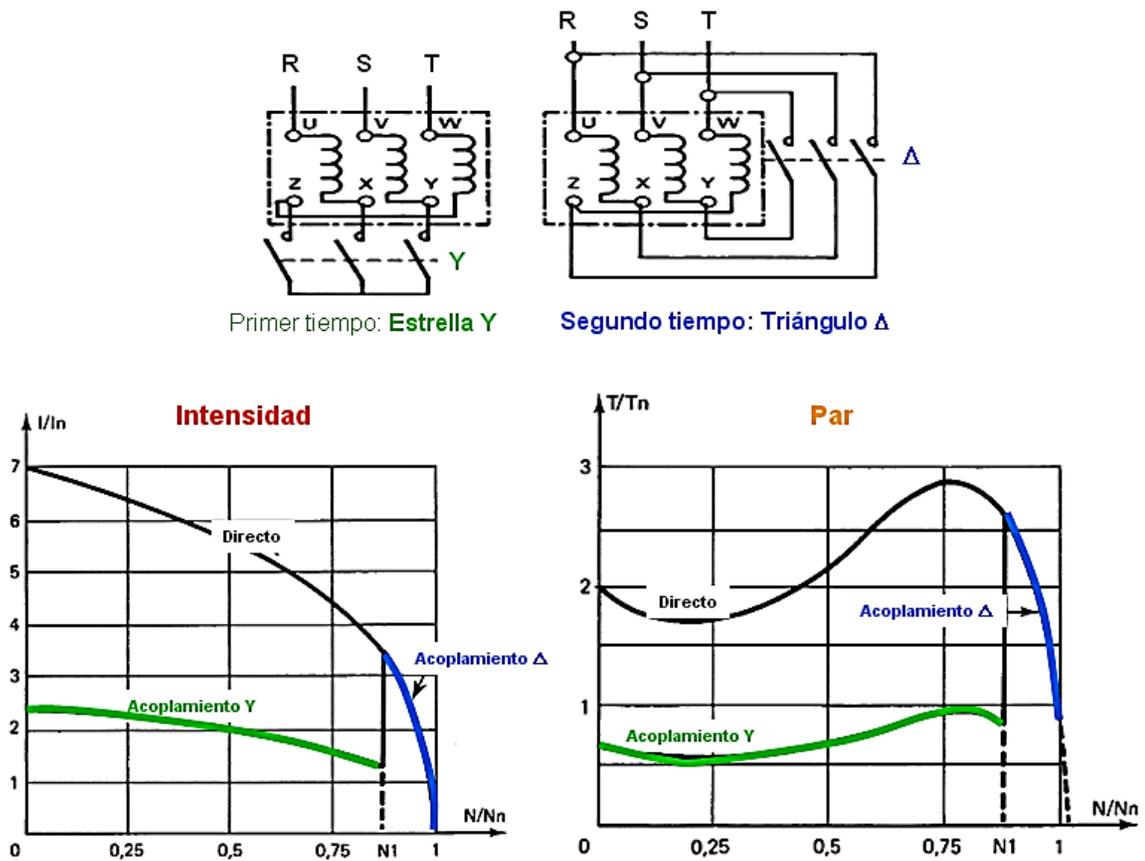


Figura. 3.10.10.

ARRANQUE POR RESISTENCIAS ESTATORICAS:

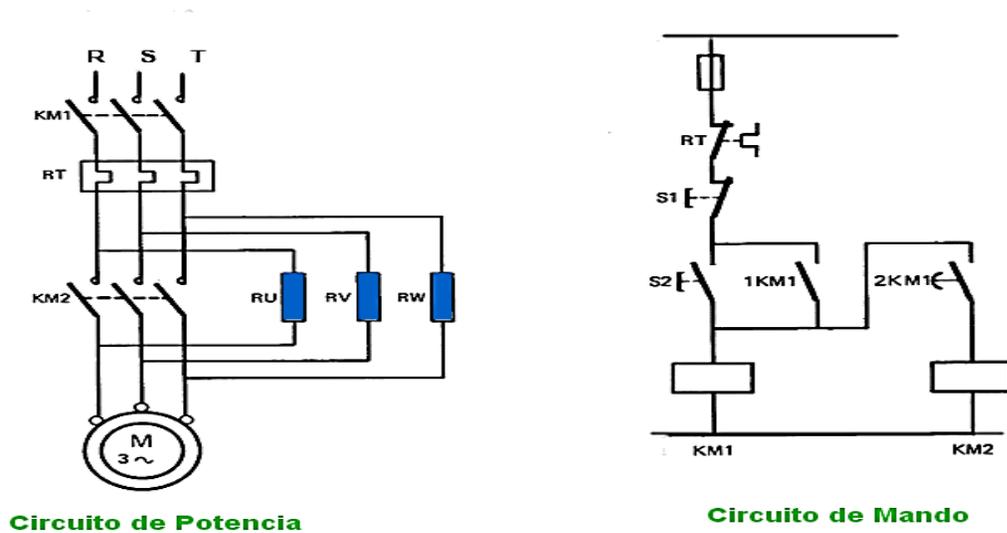


Figura. 3.10.11.

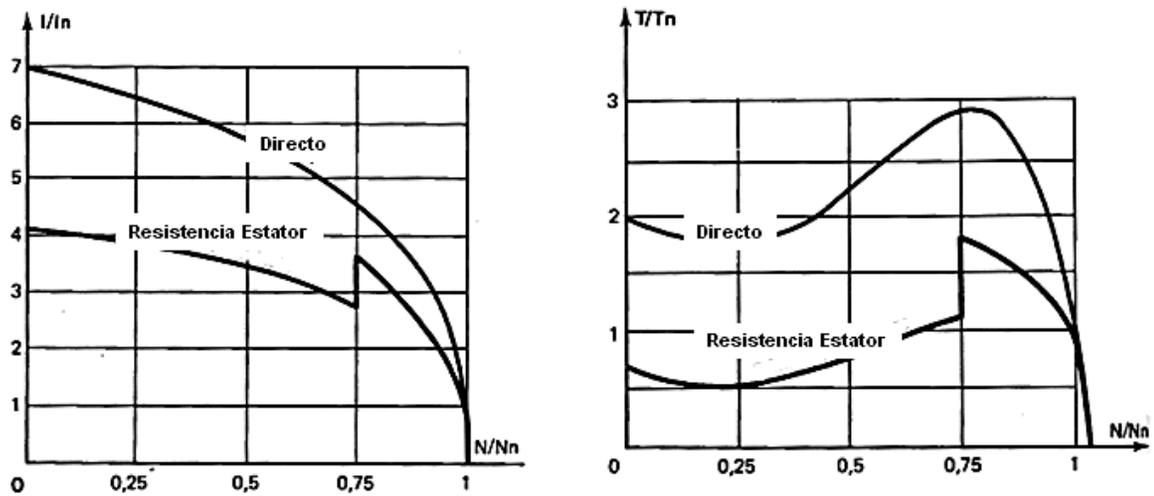


Figura. 3.10.12.

ARRANQUE POR RESISTENCIAS ROTÓRICAS:

ARRANQUE MANUAL:

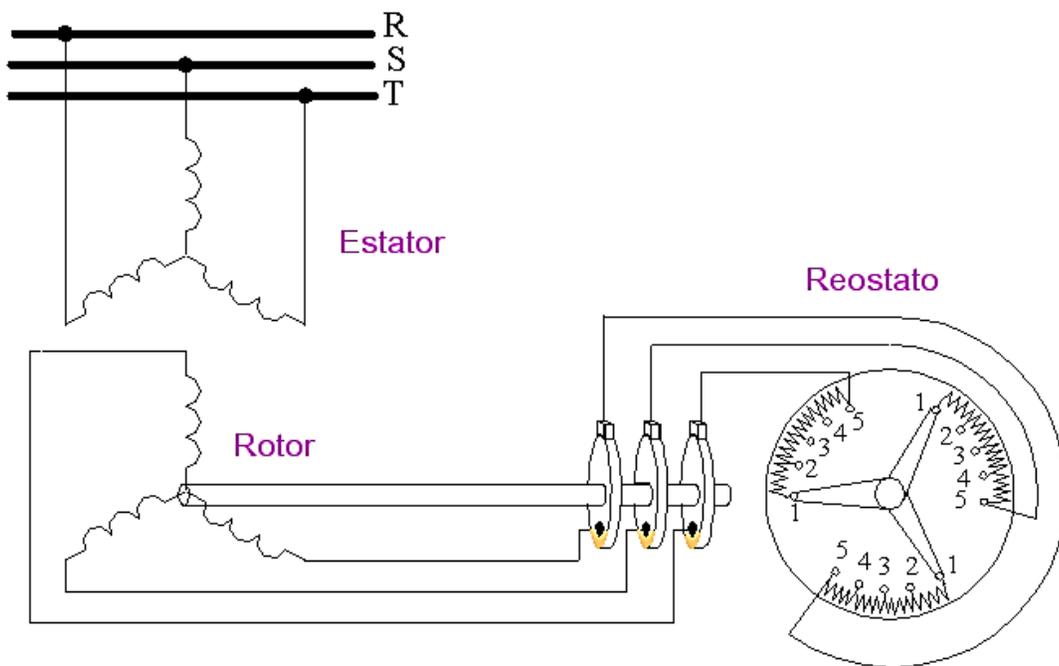


Figura. 3.10.13.

ARRANQUE CON CONTACTORES (más inversión de giro).

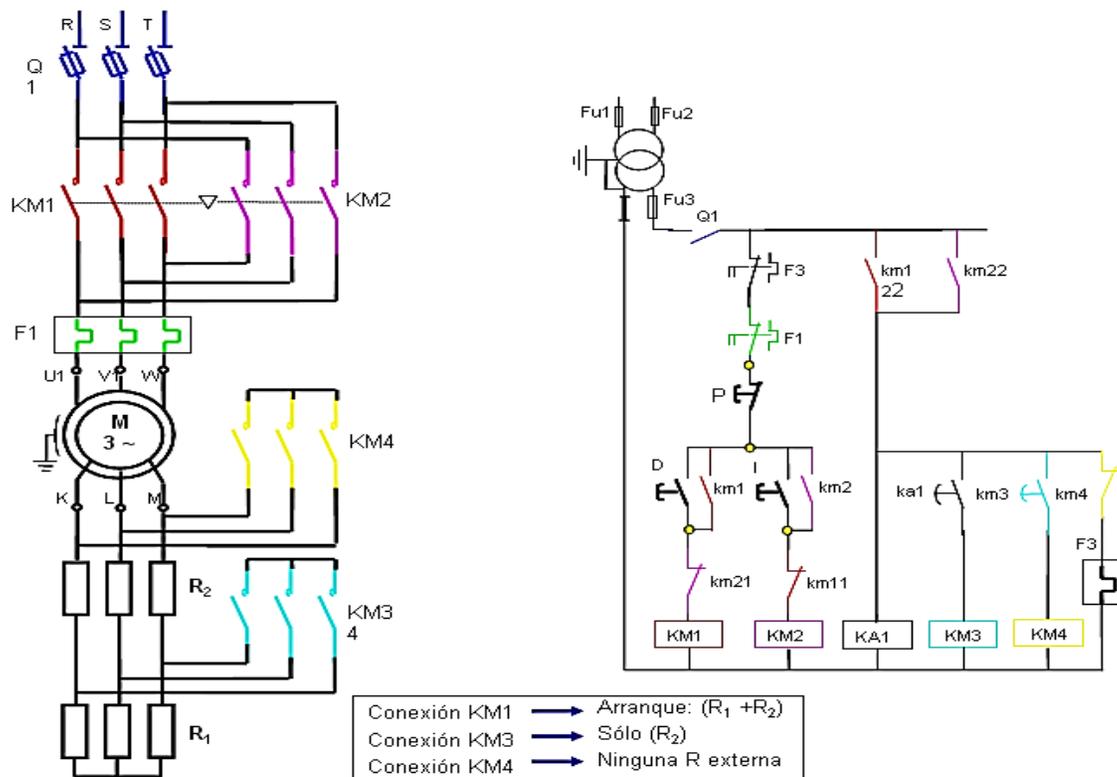


Figura. 3.10.14.

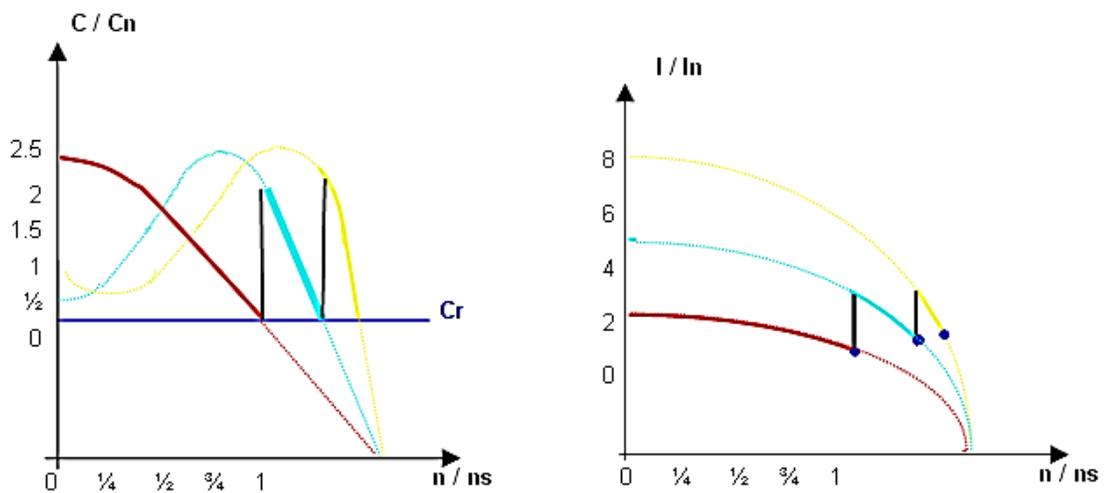
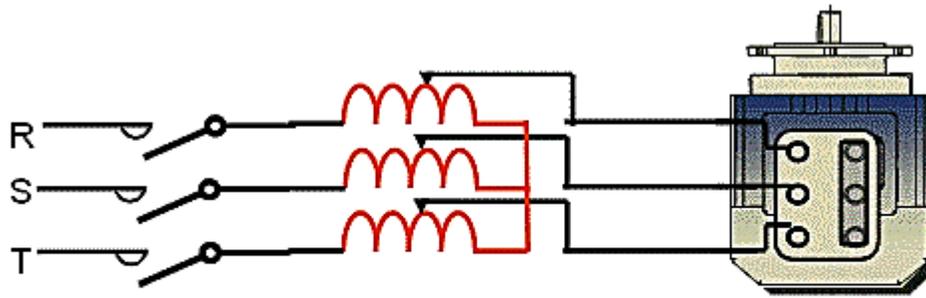


Figura. 3.10.15.

ARRANQUE POR AUTOTRANSFORMADOR:



Parado

Figura. 3.10.16.

Se puede variar la velocidad del motor actuando sobre alguna de las variables de las que depende:

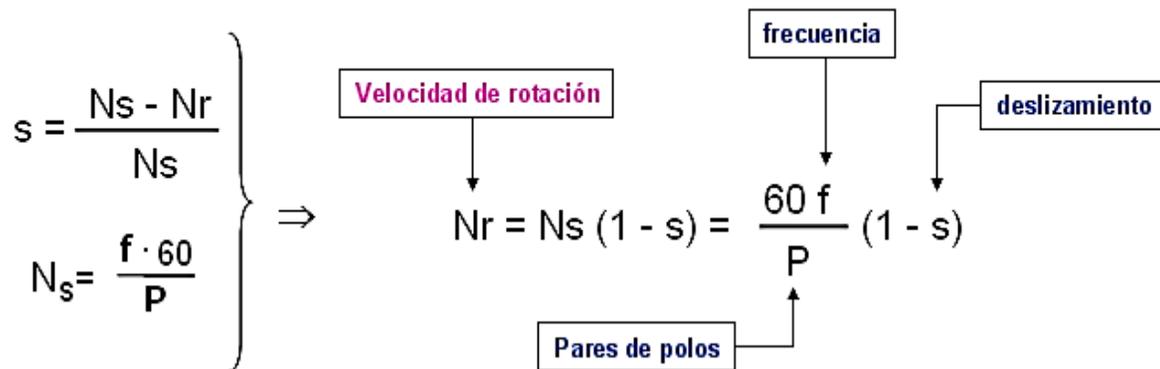


Figura. 3.10.17.

DESLIZAMIENTO.

$$(N_s) \text{ rpm} = \frac{120 f}{\#P}$$

$$\omega = 4\pi \frac{f}{p} \text{ rad/s.}$$

%S porcentaje de deslizamiento.

$$\%S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100$$

Dónde:

N_s = velocidad síncrona de las ondas de fuerzas magnetomotriz.

N_r = velocidad del rotor que depende principalmente de la carga.

Regulación de velocidad

$$Rv = \frac{Sv - Spc}{Spc} \times 100$$

3.11. EJERCICIOS*.

3.11.1.- El deslizamiento a plena carga de un motor comercial de inducción de jaula de ardilla de 60Hz, 12 polos es 5.0%, calcular.

a) La velocidad a plena carga en rpm y rad/s.

b) Regulación de velocidad.

$$Rpm = \frac{120 f}{\#p} = \frac{120 (60)}{12} = 600 \text{ rpm.}$$

$$\omega = 4\pi \frac{f}{P} = 4\pi \frac{60}{12} = 20\pi$$

$$-0.05 (20\pi) + 20\pi = Nr$$

$$Nr = 19\pi$$

$$S = \frac{N_s - Nr}{N_s} \times 100$$

$$0.05 = \frac{600 - Nr}{600}$$

$$-0.05 (600) + 600 = Nr$$

$$Nr = 570 \text{ rpm.}$$

$$Rv = \frac{600 - 570}{570} \times 100 = 5.26\%$$

3.11.2.- El rotor de un motor bipolar asíncrono gira a la velocidad de 2880 rpm. Calcular el deslizamiento relativo si la frecuencia es de 50Hz.

Datos:

$$\omega = 2880 \text{ rpm}$$

$$f = 50 \text{ Hz.}$$

$$f = \frac{\omega P}{120} \Rightarrow \frac{120 f}{P} = \frac{(120)(50 \text{ Hz})}{2 \text{ polos}} = 3000 \text{ rpm.}$$

Máquinas eléctricas.

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \times 100\% = \frac{3000rpm - 2880rpm}{3000rpm} \times 100\% = 4\%.$$

3.11.3.- El deslizamiento de un motor asíncrono es del 4%. Calcular la velocidad de giro del rotor sabiendo que la velocidad del campo magnético giratorio es de 1500rpm.

Datos:

$$s = 4\% = 0.04$$

$$\omega_0 = 1500rpm$$

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = -s\omega_0 + \omega_0 = \omega \Rightarrow \omega = \omega_0(1 - s) = 1500rpm(1 - 0.04) = 1440rpm.$$

3.11.4.- El campo magnético giratorio de un motor asíncrono trifásico gira a 3000rpm, la frecuencia de 50Hz. Calcular la frecuencia de la corriente alterna de alimentación del motor para que el campo magnético giratorio rote a 750rpm.

Datos:

$$\omega_{01} = 3000rpm.$$

$$\omega_{02} = 750rpm.$$

$$f = 50Hz.$$

$$f_1 = \frac{\omega_{01}P}{120} \Rightarrow P = \frac{120f}{\omega_{01}} = \frac{(120)(50Hz)}{3000rpm} = 2polos.$$

$$f_2 = \frac{\omega_{02}P}{120} = \frac{(750rpm)(2polos)}{120} = 12.5Hz.$$

3.11.5. Calcular el par en el eje del motor en onzas-plg y/o en N m para un motor pequeño cuya capacidad es.

- a. 0.003 hp a 2700 rpm.
- b. 10 W a 125 rad/s.
- c. 12 W a 2600 rpm.
- d. 0.05 hp a 200 rad/s.

$$a. T = \frac{hp \cdot 5252}{rpm} = \frac{0.03(5252)}{2700} = 0.0583 lb \cdot ft.$$

$$T = 0.0583 lb \cdot ft \left(\frac{192 onzas \cdot plg}{lb \cdot ft} \right) = 11.2 onzas \cdot plg.$$

Máquinas eléctricas.

$$T = 0.0583 \text{ lb} \cdot \text{ft} \left(\frac{1.355818 \text{ N m}}{\text{lb} \cdot \text{ft}} \right) = \mathbf{0.0792 \times 10^3 \text{ N m}}$$

$$\text{b. } T = \frac{10 \text{ W}}{125 \text{ rad/s}} = \mathbf{0.08 \times 10^3 \text{ N m}} \quad T = 0.08 \text{ N m} \left(\frac{\text{onzas} \cdot \text{plg}}{7.0612 \times 10^{-3} \text{ N m}} \right) = \mathbf{11.329 \text{ onzas} \cdot \text{plg.}}$$

$$\text{c. } T = \frac{12 \text{ W}}{2600 \text{ rpm} \left(\frac{\pi \text{ rad/s}}{30 \text{ rpm}} \right)} = \mathbf{0.044 \times 10^3 \text{ N m}} \quad T = 0.044 \text{ N m} \left(\frac{\text{onzas} \cdot \text{plg}}{7.0612 \times 10^{-3} \text{ N m}} \right) = \mathbf{6.23 \text{ onzas} \cdot \text{plg.}}$$

$$\text{d. } T = \frac{0.05 \text{ hp}}{200 \text{ rad/s} \left(\frac{30 \text{ rpm}}{\pi \text{ rad}} \right)} = \mathbf{0.02617 \text{ N m}} \quad T = 2.617 \times 10^{-5} \text{ N m} \left(\frac{\text{onzas} \cdot \text{plg}}{7.0612 \times 10^{-3} \text{ N m}} \right) = \mathbf{3.707 \times 10^{-3} \text{ onzas} \cdot \text{plg.}}$$

3.11.6. Calcular la potencia de salida en W y en hp de un motor pequeño cuyo par de salida y velocidad nominal, respectivamente, son:

- 12 onzas-plg a 3000 rpm.
- 150 N·m a 150 rad/s.
- 25 onzas·pulg a 2650 rpm.
- 250 N·m a 100 rad/s.

$$\text{a. } T = 12 \text{ onzas} \cdot \text{plg} \left(\frac{7.0612 \times 10^{-3} \text{ N m}}{\text{onzas} \cdot \text{plg}} \right) = \mathbf{0.0847 \text{ N m}}$$

$$N_s = 3000 \text{ rpm} \left(\frac{\pi \text{ rad/s}}{30 \text{ rpm}} \right) = \mathbf{314.16 \text{ rad/s}}$$

$$P = T (W_s) = 0.0847(314.16) = \mathbf{26.6 \text{ W}}$$

$$T = 12 \text{ onzas} \cdot \text{plg} \left(\frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{192 \text{ onzas} \cdot \text{plg}} \right) = \mathbf{0.0625 \text{ lb} \cdot \text{ft}}$$

$$p = \frac{T N_s}{5252} = \frac{0.0625(3000)}{5252} = \mathbf{0.0357 \text{ hp.}}$$

$$\text{b. } p = 150 \times 10^{-3}(150) = \mathbf{22.5 \text{ W}}$$

$$T = 150 \times 10^{-3} \text{ N m} \left(\frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{1.355818 \text{ N m}} \right) = \mathbf{0.1106 \text{ lb} \cdot \text{ft.}}$$

$$N_s = 150 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \left(\frac{30 \text{ rpm}}{\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}} \right) = \mathbf{1432.39 \text{ rpm.}}$$

$$P = \frac{1432.39(0.1106)}{5252} = \mathbf{0.03016 \text{ hp.}}$$

$$\text{c. } T = 25 \text{ onzas} \cdot \text{plg} \left(\frac{7.0612 \times 10^{-3} \text{ N m}}{\text{onzas} \cdot \text{plg}} \right) = \mathbf{0.1765 \text{ N m}} \left(\frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{1.355818 \text{ N m}} \right) = \mathbf{0.1301 \text{ lb} \cdot \text{ft.}}$$

$$N_s = 2650 \text{ rpm} \left(\frac{\pi \text{ rad}}{30 \text{ rpm}} \right) = 277.5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$P = 0.1765(277.5) = \mathbf{48.978 \text{ W}}$$

$$P = \frac{0.1301(2650)}{5252} = \mathbf{0.0656 \text{ hp.}}$$

$$\mathbf{d.} \quad P = 250 \times 10^{-3}(100) = \mathbf{25 \text{ W}}$$

$$T = 250 \times 10^{-3} \text{ N m} \left(\frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{1.355818 \text{ N m}} \right) = \mathbf{0.1844 \text{ lb} \cdot \text{ft.}}$$

$$N_s = 100 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \left(\frac{30 \text{ rpm}}{\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}} \right) = \mathbf{954.93 \text{ rpm.}}$$

$$p = \frac{954.93 (0.1844)}{5252} = \mathbf{0.0335 \text{ hp.}}$$

3.11.7. Los datos nominales de un motor de fase partida son 220 V, 175 W, 180 rad/s, 0.5 FP y 45% de eficiencia a la carga nominal. A su carga nominal, calcular.

- La corriente de línea.
- El par en N·m y en onzas·pulg.

DATOS:

$$V = 220 \text{ v}$$

$$P = 175 \text{ W}$$

$$\omega_s = 180 \text{ rad/s}$$

$$FP = 0.5$$

$$\eta = 0.45$$

$$\mathbf{a.} \quad \eta = \frac{P_{\text{util}}}{P_{\text{absorbida}}} = \frac{P_{\text{util}}}{VI \cos \theta} \Rightarrow I = \frac{P_{\text{util}}}{\eta V \cos \theta} I_{\text{nom}} = \frac{175}{(220)(0.5)(0.45)} = \mathbf{3.535 \text{ A.}}$$

$$\mathbf{b.} \quad T = \frac{175}{180} \times 1000 = \mathbf{972.2 \text{ N m.}}$$

$$T = 0.9722 \text{ N m} \left(\frac{\text{onzas} \cdot \text{plg}}{7.0612 \times 10^{-3}} \right) = \mathbf{137.7 \text{ onzas} \cdot \text{plg.}}$$

3.11.8. Los datos de un motor de fase partida son 115 V, 120 W, 3.5 A, 36π rad/s y 50% de eficiencia a la carga nominal. Calcular los siguientes parámetros nominales:

- Factor de potencia.
- Par en N·m y en onzas·pulg.

DATOS:

$$V = 115 \text{ v}$$

$$P_s = 120 \text{ W}$$

$$I = 3.5 \text{ A}$$

$$W_s = 36 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\eta = 0.5$$

$$\text{a. } \eta = \frac{P_s}{VI \cos\theta} \Rightarrow \cos\theta = \frac{P_s}{VI \eta} = \frac{120 \text{ W}}{(115)(3.5)(0.5)} = \mathbf{0.596} \cos\theta = FP = 0.596 \approx \mathbf{0.6}.$$

$$\text{b. } T = \frac{P}{W_s} = \frac{120}{36\pi} = 1.06103 \times 1000 = \mathbf{1061.03 \text{ N m}}.$$

$$T = 1.06103 \text{ N m} \left(\frac{\text{onzas} \cdot \text{plg}}{7.0612 \times 10^{-3}} \right) = \mathbf{150.26 \text{ onzas} \cdot \text{plg}}.$$

3.11.9. Un motor de fase partida permanente, de doble capacitor, tiene capacidad de 250 W, 230 V, 2.2 A; 28π rad/s a un factor de potencia de 0.65 en retraso. Calcular:

- La eficiencia nominal.
- El par nominal en N·m y en pie lb.

DATOS:

$$P_s = 250 \text{ W}$$

$$V = 230 \text{ v}$$

$$I = 2.2 \text{ A}$$

$$W_s = 28\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$FP = 0.65$$

$$\text{a. } \eta = \frac{P_s}{VI \cos\theta} \times 100 = \frac{250}{(230)(2.2)(0.65)} \times 100 = \mathbf{76\%}.$$

$$\text{b. } T = \frac{P}{W_s} = \frac{250}{28\pi} = \mathbf{2.842 \text{ N m}}$$

$$T = 2.842 \text{ N m} \left(\frac{\text{lb} \cdot \text{ft}}{1.355818 \text{ N m}} \right) = \mathbf{2.096 \text{ lb} \cdot \text{ft}}.$$

3.11.10. Un motor de arranque de 660 W, 115 V, 60Hz toma 13.8 A del suministro a carga nominal. Si la eficiencia es 65% y la velocidad nominal es 1750 rpm, calcular:

- La potencia de entrada a la carga nominal.
- El factor de potencia a la carga nominal.
- La potencia del motor en hp.

Máquinas eléctricas.

DATOS:

$$P_s = 600 \text{ W}$$

$$V = 115 \text{ V}$$

$$F = 60 \text{ Hz}$$

$$I = 13.8 \text{ A}$$

$$\eta = 0.65$$

$$n_s = 1750 \text{ rpm}$$

$$a. \eta = \frac{P_s}{P_e} \Rightarrow P_e = \frac{P_s}{\eta} = \frac{600}{0.65} = \mathbf{923.07 \text{ W}}$$

$$b. FP = \frac{P_s}{VI\eta} = \frac{600}{(115)(13.8)(0.65)} = \mathbf{0.582}$$

$$c. P = 600 \text{ W} \left(\frac{\text{hp}}{745.7 \text{ W}} \right) = \mathbf{0.8046 \text{ hp.}}$$

3.11.11. Un motor monofásico de ca de 4 polos, de fase partida, 1/3 hp, toma 7.2 A de un suministro de 115 V, 60 Hz con factor de potencia de 75% y trabaja a una velocidad de 1720 rpm cuando la carga nominal se aplica a su eje. Calcular:

- La eficiencia a plena carga.
- El deslizamiento a plena carga.
- El par nominal de salida en lb·pie y en N·m.
- El par máximo si la falla se presenta a un deslizamiento de 30%.
- El par de arranque en lb·pie y en N·m.
- La relación de pares máximo y de arranque, respectivamente, al par nominal.

DATOS:

$$\#POLOS = 4$$

$$P = 1/3$$

$$I = 7.2 \text{ A}$$

$$V = 115 \text{ v}$$

$$F = 60 \text{ Hz}$$

$$FP = 0.75$$

$$n_r = 1720 \text{ rpm}$$

- a. $\eta = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_s}{VI \cos \theta} = \frac{\frac{1}{3}(746)}{(115)(7.2)(0.75)} = 0.40 \times 100 = \mathbf{40\%}$
- b. $n_s = \frac{120 \times F}{\#P} = \frac{120(60)}{4} = \mathbf{1800 \text{ rpm}}$ $\omega_s = 4\pi \left(\frac{60}{4}\right) = \mathbf{188.5 \text{ rad/s}}$
 $\%S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 = \frac{1800 - 1720}{1800} \times 100 = \mathbf{4.44\% = 0.044}$
- c. $T_{nom} = 7.04 \left(\frac{P_s}{n_r}\right) = 7.04 \left(\frac{\frac{746}{3}}{1720}\right) = \mathbf{1.017 \text{ lb} \cdot \text{ft}}$
 $T = 1.017 \text{ lb} \cdot \text{ft} \left(\frac{1.355818 \text{ N m}}{\text{lb} \cdot \text{ft}}\right) = \mathbf{1.3799 \text{ N m}}$
- d. $S_{\%} = 0.3$ $n_r = 1800(1 - 0.3) = \mathbf{1260}$
 $T_{max} = 7.04 \left(\frac{P_{in}}{n_r}\right) = 7.04 \left(\frac{621}{1260}\right) = \mathbf{3.4746 \text{ lb} \cdot \text{ft} \approx 3.5 \text{ lb} \cdot \text{ft}}$
- e. $T_A = T_{MAX} \left(\frac{\frac{2}{s_b + s}}{\frac{2}{s} + \frac{2}{s_b}}\right) = 3.5 \left(\frac{\frac{2}{0.3 + 1}}{\frac{2}{1} + \frac{2}{0.3}}\right) = 1.926 \approx \mathbf{1.93 \text{ lb} \cdot \text{ft}}$
 $T_A = 1.93 \text{ lb} \cdot \text{ft} \left(\frac{1.355818 \text{ N m}}{\text{lb} \cdot \text{ft}}\right) = 2.616 \text{ N m} \approx \mathbf{2.62 \text{ N m}}$
- f. $\frac{T_{MAX}}{T_{NOM}} = \frac{3.5}{1.017} = \mathbf{3.44}$ $\frac{T_A}{T_{NOM}} = \frac{1.93}{1.017} = \mathbf{1.89}$

3.11.12. Un motor monofásico de inducción de 2 polos, 60 HZ, 115 V, de arranque por reluctancia tiene una capacidad de $\frac{1}{25}$ hp a 3000 rpm y tiene una eficiencia de 30% a plena carga. Calcular:

- La entrada de potencia a plena carga.
- La corriente de plena carga, si el factor de potencia a plena carga es 0.45.
- El deslizamiento y el par de plena carga.
- El par máximo, en onzas-pulg, si la falla se presenta a un deslizamiento de 40%.
- El par de arranque.
- La relación de pares máximos y de arranque, respectivamente, con el par de plena carga.
- Explica por qué el par de arranque es menor que el par nominal.

DATOS:

$$\# P = 2$$

$$F = 60 \text{ Hz}$$

$$V = 115 \text{ v}$$

$$P = 1/25 \text{ hp}$$

$$n_r = 3000 \text{ rpm}$$

$$\eta = 0.3$$

$$FP = 0.45$$

$$S_b = 0.4$$

$$a. \eta = \frac{P_s}{P_e} \Rightarrow P_e = \frac{P_s}{\eta} = \frac{\frac{1}{25}(746)}{0.3} = \mathbf{99.466 \text{ W}}$$

$$b. P_e = VI \cos\theta \Rightarrow I = \frac{P_e}{V \cos\theta} = \frac{99.46}{115(0.45)} = \mathbf{1.922 \text{ A}}$$

$$c. S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\frac{120(60)}{2} - 3000}{\frac{120(60)}{2}} = \frac{3600 - 3000}{3600} = \mathbf{0.166}$$

$$T = 7.04 \left(\frac{P_{in}}{W_r} \right) = 7.04 \left(\frac{99.46}{3000} \right) = 0.2334 \text{ lb} \cdot \text{ft} \left(\frac{192 \text{ onzas} \cdot \text{plg}}{\text{lb} \cdot \text{ft}} \right) = \mathbf{44.8 \text{ onzas} \cdot \text{plg}}$$

$$d. n_r = n_s(1 - S_b) = 3600(1 - 0.4) = \mathbf{2160 \text{ rpm}}$$

$$T_{MAX} = 7.04 \left(\frac{P_{in}}{n_r} \right) = 7.04 \left(\frac{99.46}{2160} \right) = 0.324 \text{ lb} \cdot \text{ft} \left(\frac{192 \text{ onzas} \cdot \text{plg}}{\text{lb} \cdot \text{ft}} \right) = \mathbf{62.24 \text{ onzas} \cdot \text{plg}}$$

$$e. T_A = T_{MAX} \left(\frac{2}{S + S_b} \right) = 62.24 \left(\frac{2}{\frac{0.4}{1} + \frac{1}{0.4}} \right) = 62.24 \left(\frac{2}{29} \right) = \mathbf{42.9 \text{ onzas} \cdot \text{plg}}$$

$$f. \frac{T_{MAX}}{T} = \frac{62.24}{44.8} = \mathbf{1.389} \quad \frac{T_A}{T} = \frac{42.9}{44.8} = \mathbf{0.957}$$

- g. Porque es un motor de arranque por reluctancia el cual el par de arranque es diferente, menor al 50% del par nominal.

3.11.13. Una prueba de dinamómetro de un motor monofásico de 4 polos, 115 V, trabajando a la velocidad nominal, arrojo los siguientes datos de potencia tomada por el motor, 150 W; corriente de entrada, 2.0 A; velocidad, 1750 rpm; longitud del brazo del freno, 12 pulg; indicación en la escala del dinamómetro, 6 oz a carga nominal. Cuando el motor se hizo trabajar con sobrecarga para determinar el par máximo, se obtuvieron los siguientes datos: potencia tomada por el motor, 550 W; corriente de entrada, 10.0 A; velocidad, 1400 rpm; indicación en la escala del dinamómetro, a carga máxima, 26.5 oz. Calcular:

- La eficiencia a la carga nominal.
- El factor de potencia a carga nominal.
- El caballaje al par nominal.
- Los pares máximo y de arranque.
- La eficiencia y el factor de potencia a par máximo.
- El par nominal a partir del par máximo.
- El porcentaje de error en el par nominal que se obtuvo en la parte (f) en comparación con el que se obtuvo en la parte (c).

DATOS:

$$\#P = 4$$

$$V = 115 \text{ v}$$

$$P_e = 150 \text{ W}$$

$$I_1 = 2 A$$

$$n_{r1} = 1750 \text{ rpm}$$

$$L = 12 \text{ plg.}$$

$$F_{z1} = 6 \text{ oz}$$

$$P_{s2} = 550 \text{ W}$$

$$I_2 = 10 A$$

$$n_{r2} = 1400 \text{ rpm}$$

$$F_{z2} = 26.5 \text{ oz}$$

$$F = 60 \text{ HZ}$$

$$a. T = 6(12) = 72 \text{ oz} \cdot \text{plg} \left(\frac{7.0612 \times 10^{-3} \text{ N m}}{\text{oz} \cdot \text{plg}} \right) = \mathbf{0.5084 \text{ N m}}$$

$$W_{sm} = 1750 \text{ rpm} \left(\frac{\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{30 \text{ rpm}} \right) = \mathbf{183.26 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}$$

$$P_s = 183.26(0.5084) = \mathbf{93.2 \text{ W}}$$

$$\eta = \frac{93.2}{150} \times 100 = \mathbf{62.1\%}$$

$$b. P = VI \cos \theta \Rightarrow \cos \theta = \frac{P_m}{VI} = \frac{150}{(115)(2)} = \mathbf{0.652}$$

$$c. 93.2 \text{ W} \left(\frac{\text{hp}}{746 \text{ W}} \right) = 0.1249 \approx 0.125 = \mathbf{\frac{1}{8} \text{ hp}}$$

$$T = 6 \text{ oz}(12 \text{ plg}) = \mathbf{72 \text{ oz} \cdot \text{plg}}$$

$$d. T_{MAX} = 26.5(12) = \mathbf{318 \text{ oz} \cdot \text{plg}}$$

$$T_A = T_b \left(\frac{2}{\frac{1}{s} + \frac{1}{s}} \right) = 318 \left(\frac{2}{\frac{1}{0.22} + \frac{1}{1}} \right) = \mathbf{133.46 \text{ oz} \cdot \text{plg}}$$

$$S = \frac{1800 - 1400}{1800} = \mathbf{0.22}$$

$$e. T_{MAX} = 318 \text{ oz} \cdot \text{plg} \left(\frac{7.0612 \times 10^{-3} \text{ N m}}{\text{oz} \cdot \text{plg}} \right) = \mathbf{2.245 \text{ N m}}$$

$$W_s = 1400 \text{ rpm} \left(\frac{\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{30 \text{ rpm}} \right) = \mathbf{146.6 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}$$

$$P = 2.245(146.6) \quad P = \mathbf{329.117 \text{ W}}$$

$$\eta = \frac{329.117}{550} = 0.598 \times 100 = \mathbf{59.8\%}$$

$$P = VI \cos \theta \Rightarrow \cos \theta = \frac{P_e}{VI} = \frac{550}{(115)(10)(0.598)} = \mathbf{0.7997}$$

$$f. S = \frac{1800 - 1750}{1800} = \mathbf{0.0277} \quad S = \frac{120 F}{\#P} = \frac{120(60)}{4} = \mathbf{1800 \text{ rpm}}$$

$$T = T_b \left(\frac{2}{\frac{Sb}{S} + \frac{S}{Sb}} \right) = 318 \left(\frac{2}{\frac{0.2}{0.0277} + \frac{0.0277}{0.2}} \right) = \mathbf{78.8 \text{ oz} \cdot \text{plg}}$$

g. $\%E = \frac{78.8-72}{78.8} \times 100 = \mathbf{8.629}$

Par externo, potencia y velocidad dependiendo del tamaño o la aplicación particular del motor su rendimiento se puede especificar en la placa ya sea como potencia o (eficiencia) o como par, además de la velocidad.

Si se conocen dos de esos tres términos se puede calcular el tercero, porque se relacionan entre sí.

(Sistema ingles) $hp = \frac{T_s}{5252} (hp)$.

Dónde:

T: es el par en libras-pie (lb-pie).

S: es la velocidad en revoluciones por minuto (rpm).

(Sistema SI) $hp = \frac{WT}{746} (hp)$.

Dónde:

T: es el par en newton-metros (N-m).

W: es la velocidad en radianes por segundo (rad/S).

3.12. Utilización de material didáctico para los motores trifásicos, (Software)*.

CATÁLOGO ELECTRÓNICO

Catálogo Electrónico Programa de aplicación Retorno de la Inversión Opciones Ayuda Salir

Standard

Potencia (HP (cv))	0.25
Polaridad	4
Frecuencia (Hz)	60
Conjugado (Nm)	1.01
Tensión (V)	220/380
Carcasa	63
RPM	1710
In (A)	1.14/0.66
Rendimiento [100%]	64.0
F.P. (100%)	0.65
Aislamiento	<input checked="" type="radio"/> B <input type="radio"/> F <input type="radio"/> H
Ruido dB(A)	48
Corriente en vacío (A)	1.00/0.50
Ip/In	4.50

HP (cv)	Carcasa	In (A)	Ip/In	Cp/Cn	Cm/Cn	Rendimiento (%)			Factor de Pot.			FS	INERCIA kgm²	Tr (s)	MASA kg
						50%	75%	100%	50%	75%	100%				
0.25	63	1.14	4.50	2.00	3.00	53.0	60.0	64.0	0.47	0.57	0.65	1.15	0.0006	10.0	7.50

Figura. 3.12.1. Características del motor.

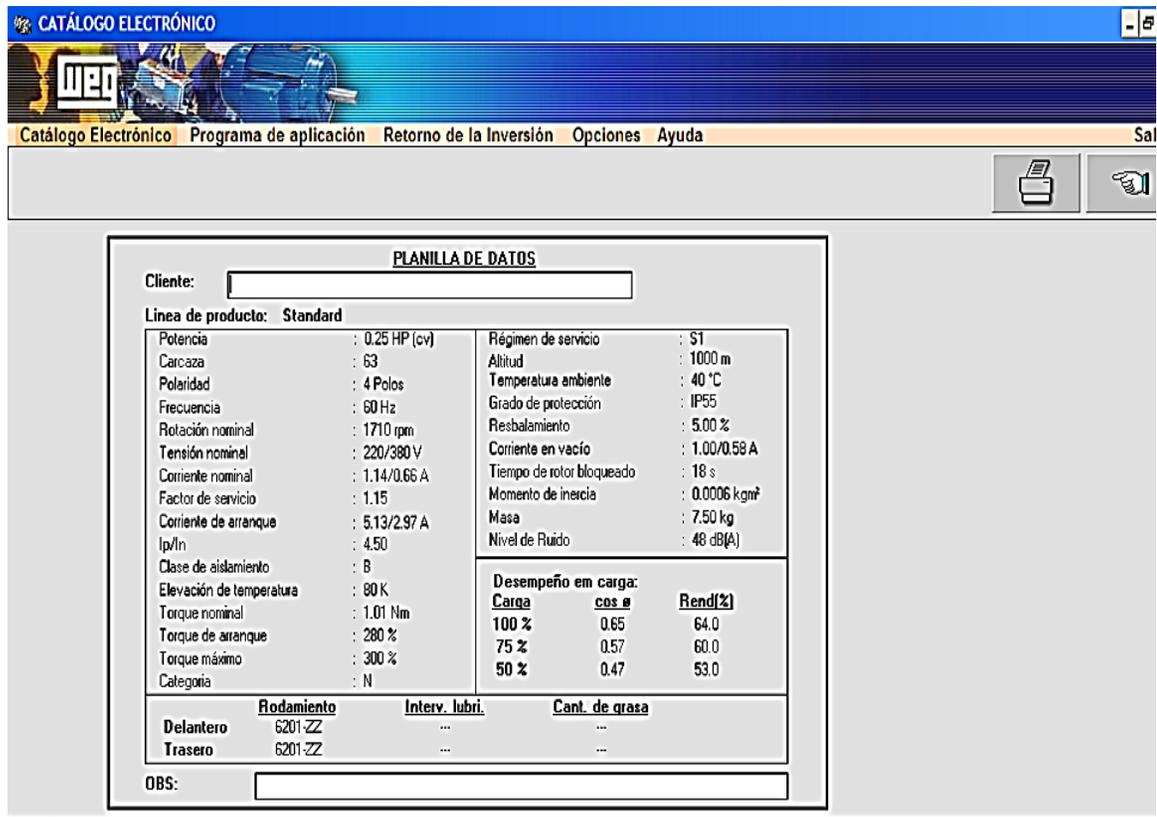


Figura. 3.12.2. Características del motor.

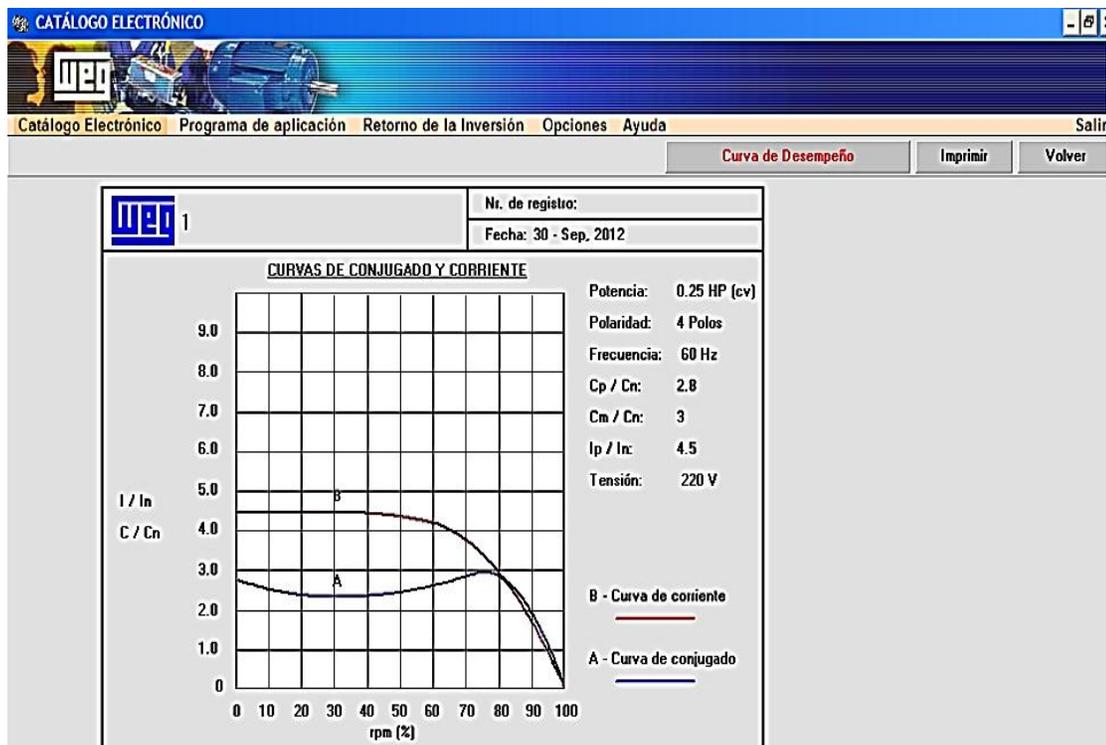


Figura. 3.12.3. Características del motor.

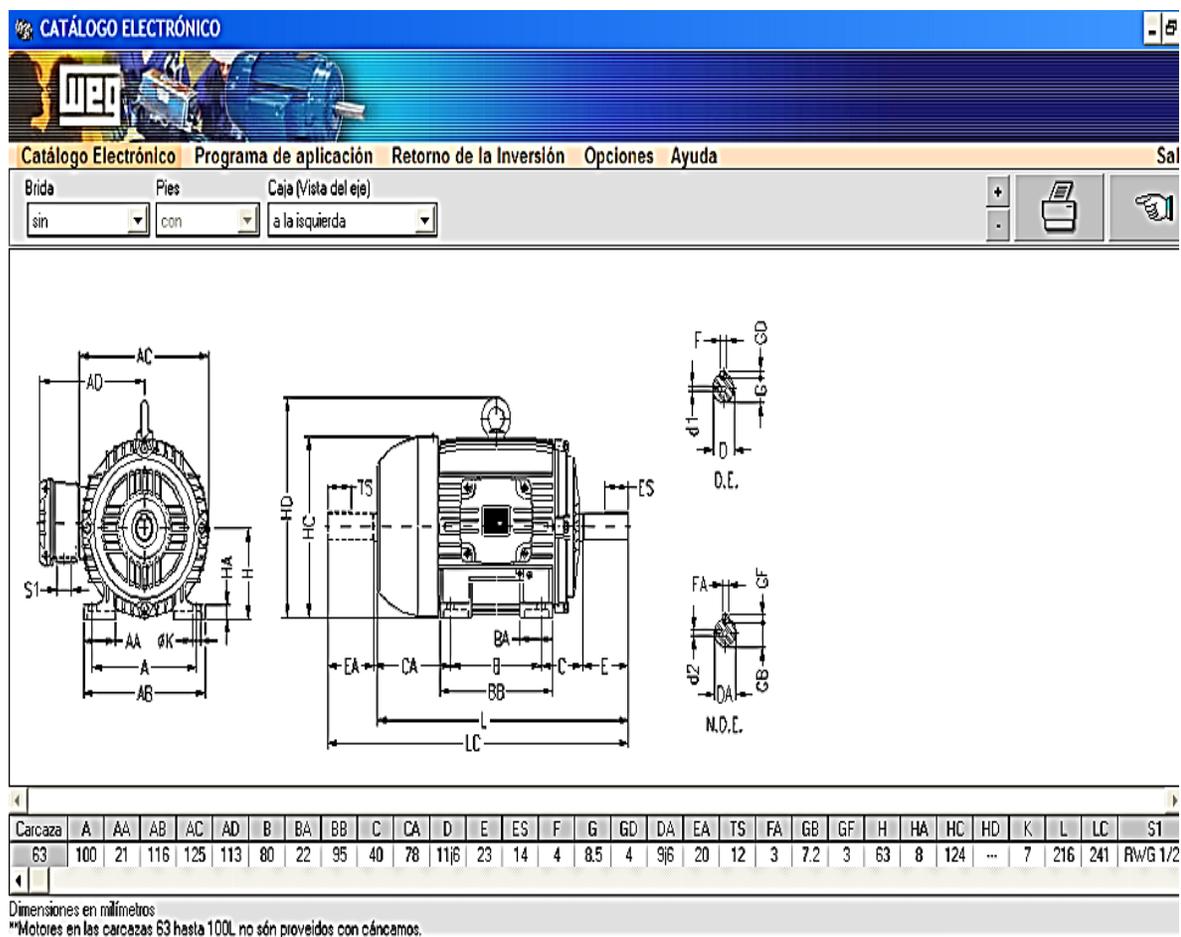


Figura. 3.12.4. Dimensiones del motor en milímetros.



Figura. 3.12.5. Partes de un motor trifásico (tapa trasera).

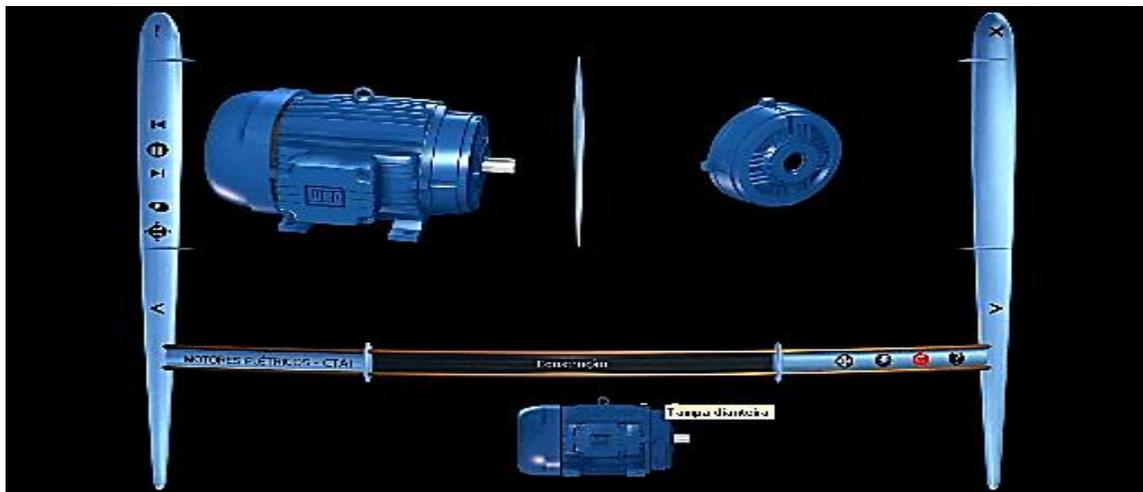


Figura. 3.12.6. Partes de un motor trifásico (tapa delantera).

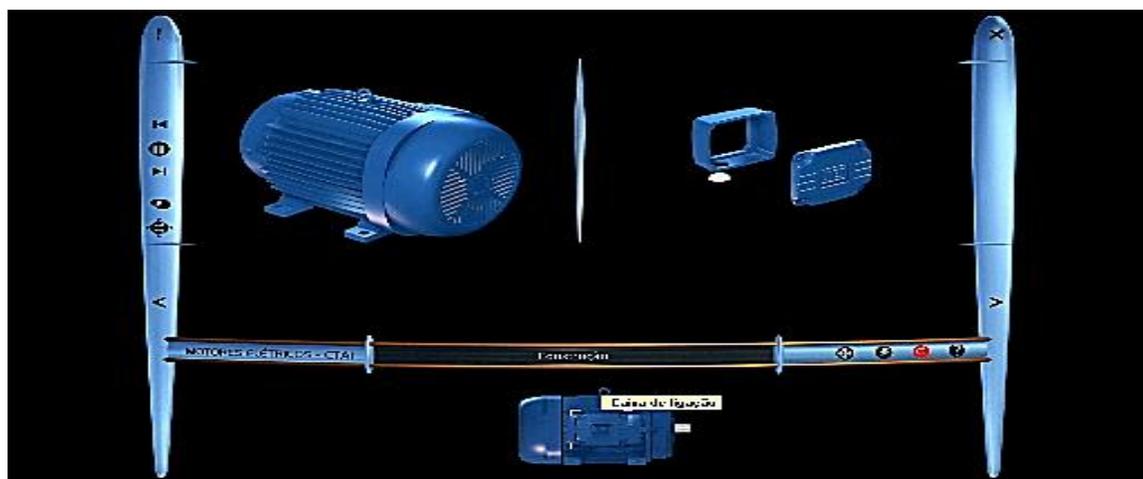


Figura. 3.12.7. Partes de un motor trifásico (caja de conexiones).

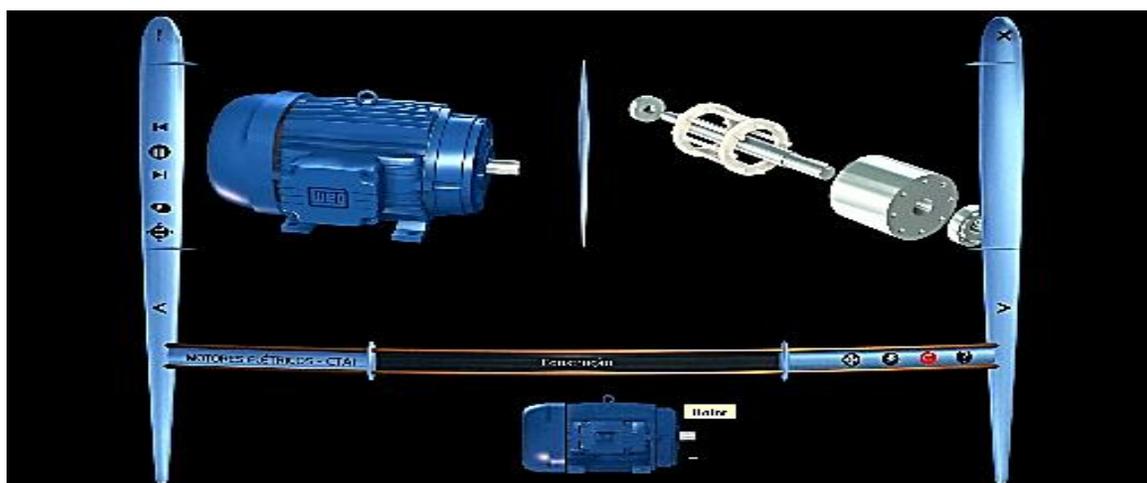


Figura. 3.12.8. Partes de un motor trifásico (armadura).

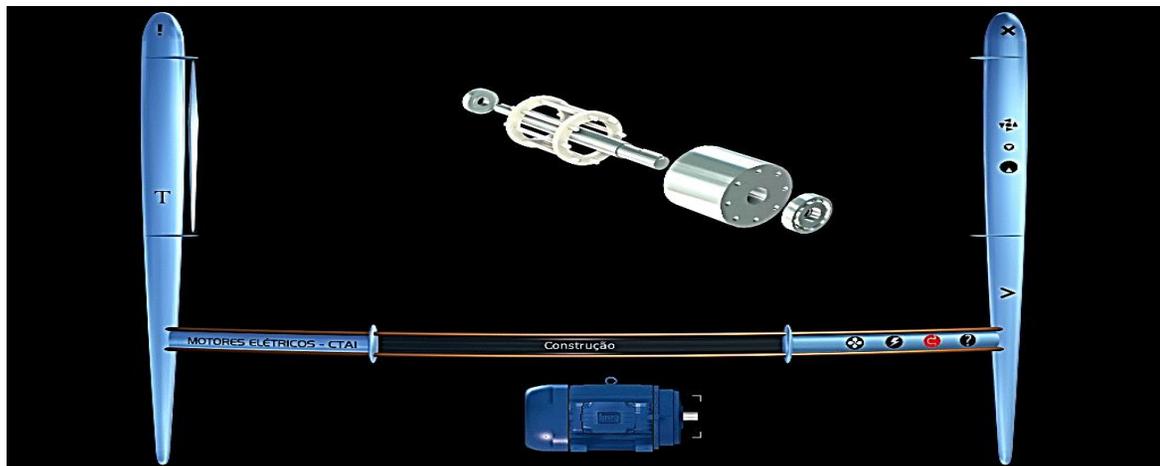


Figura. 3.12.9. Partes de un motor trifásico (armadura).

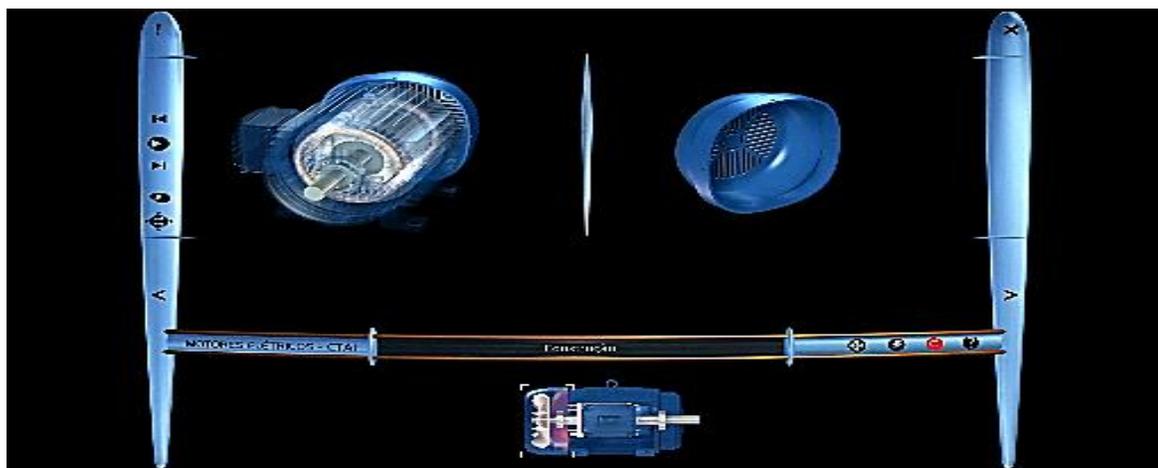


Figura. 3.12.10. Partes de un motor trifásico (piezas dentro de la carcasa).

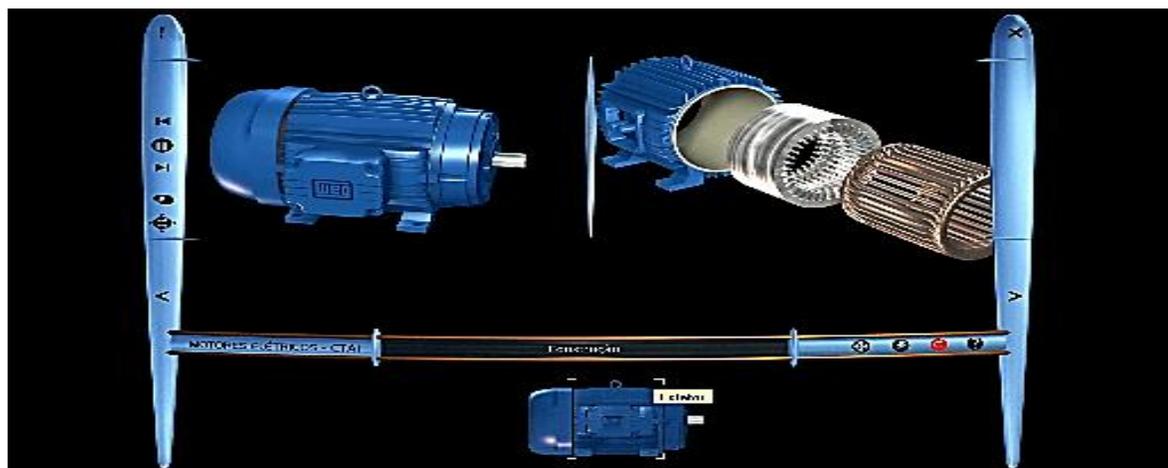


Figura. 3.12.11. Partes de un motor trifásico (estator).

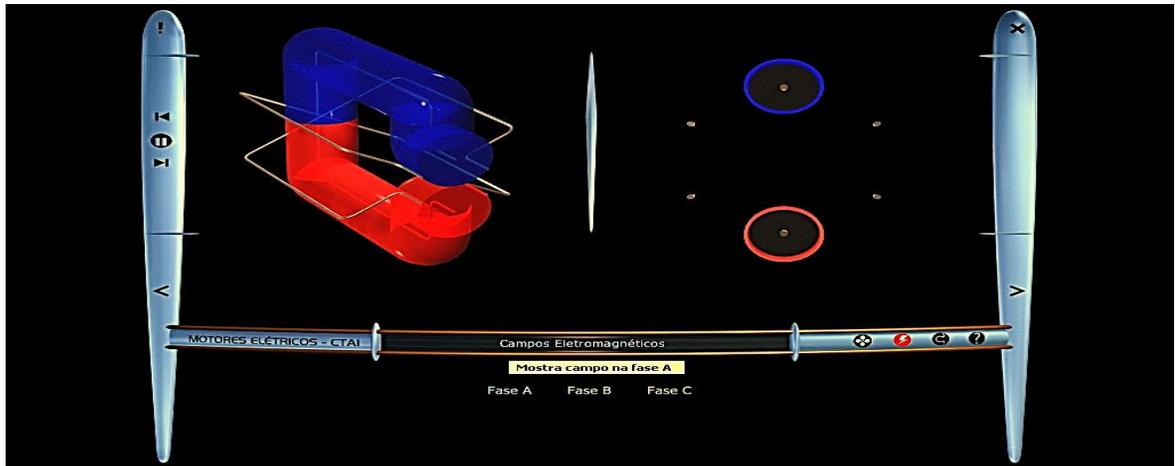


Figura. 3.12.12. Visualización del campo electromagnético en la fase A.

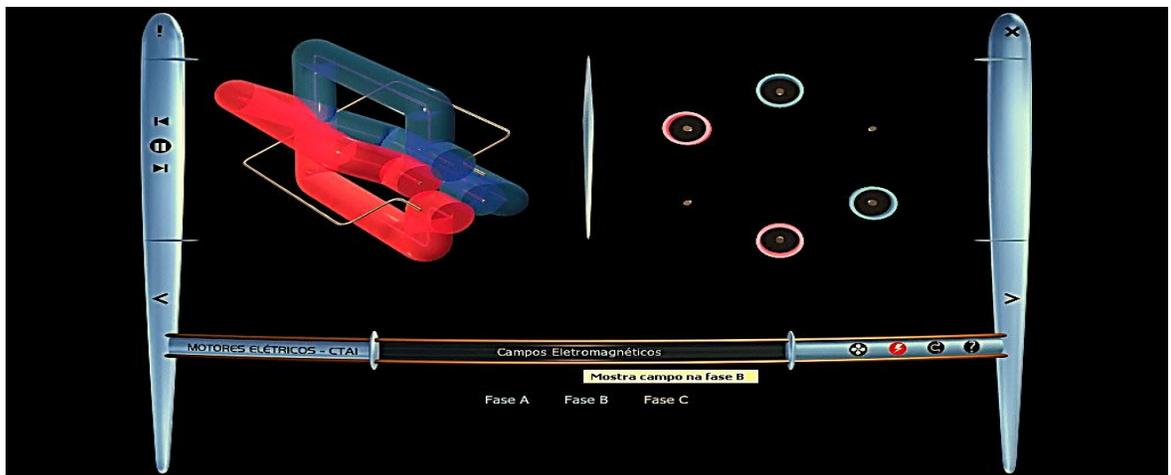


Figura. 3.12.13. Visualización del campo electromagnético en la fase B y A.

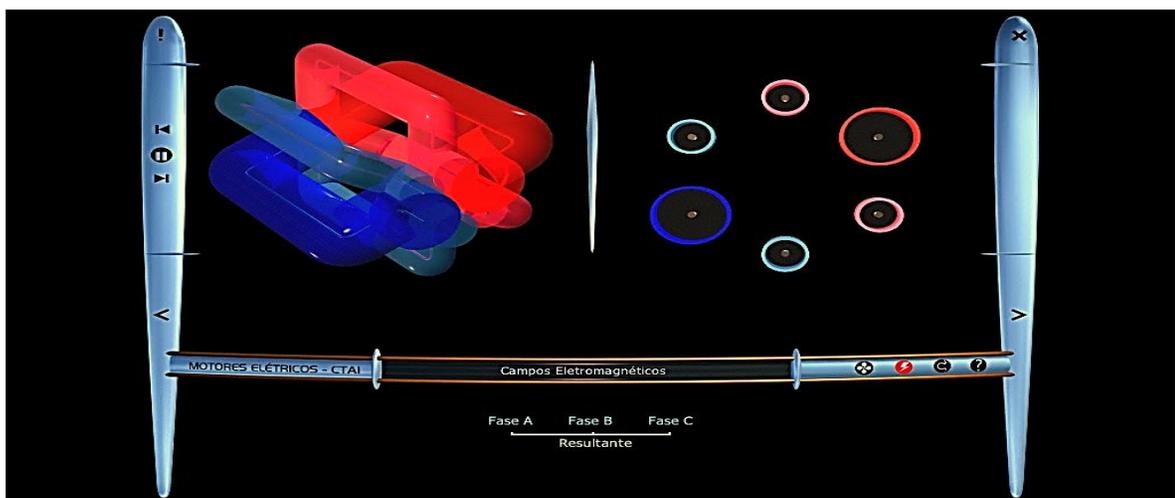


Figura. 3.12.14. Visualización de los campos electromagnéticos, (fase C).

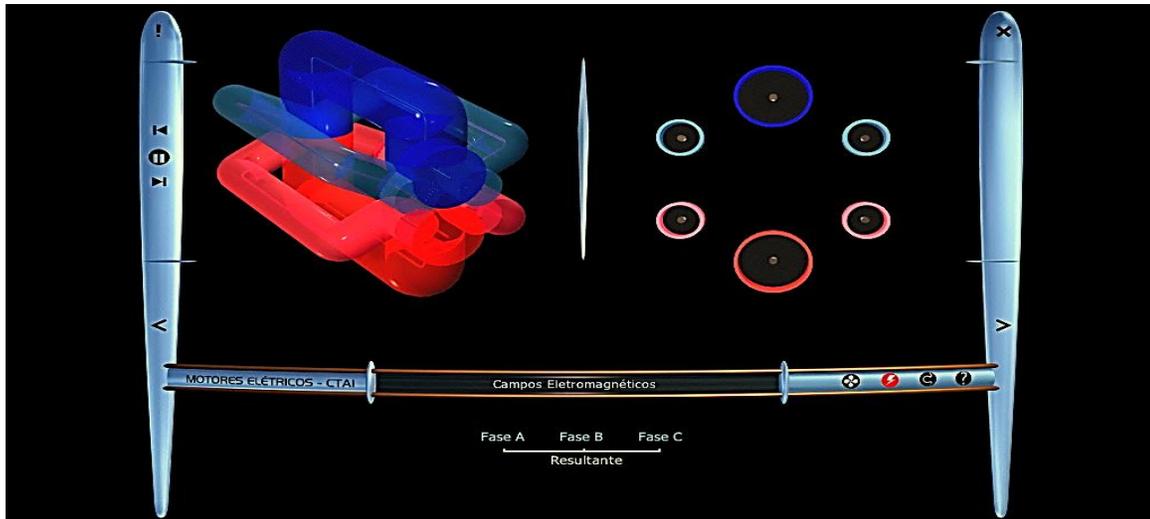


Figura. 3.12.15. Visualización de los campos electromagnéticos, (fase A).

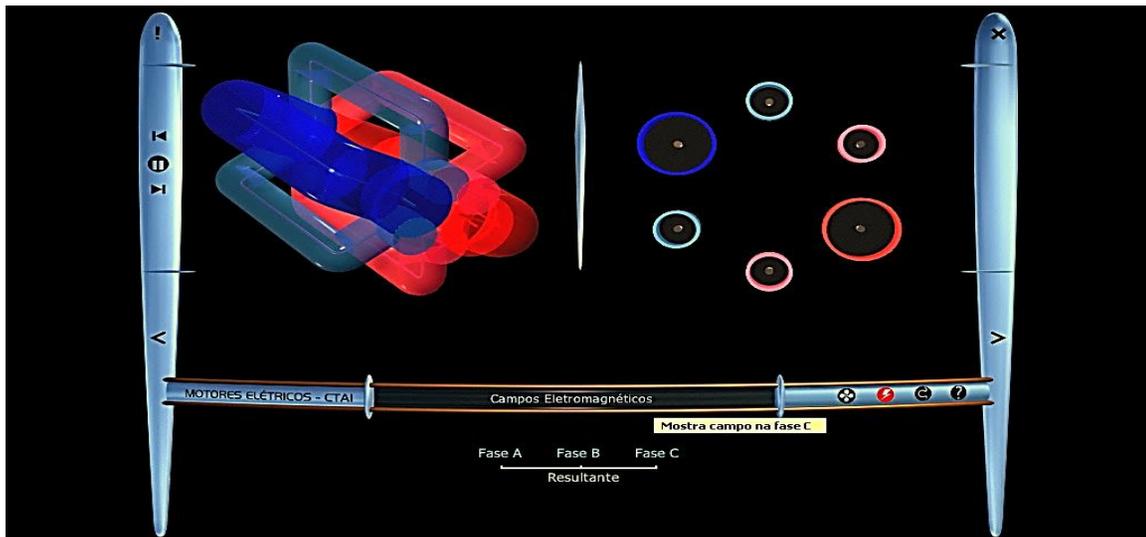


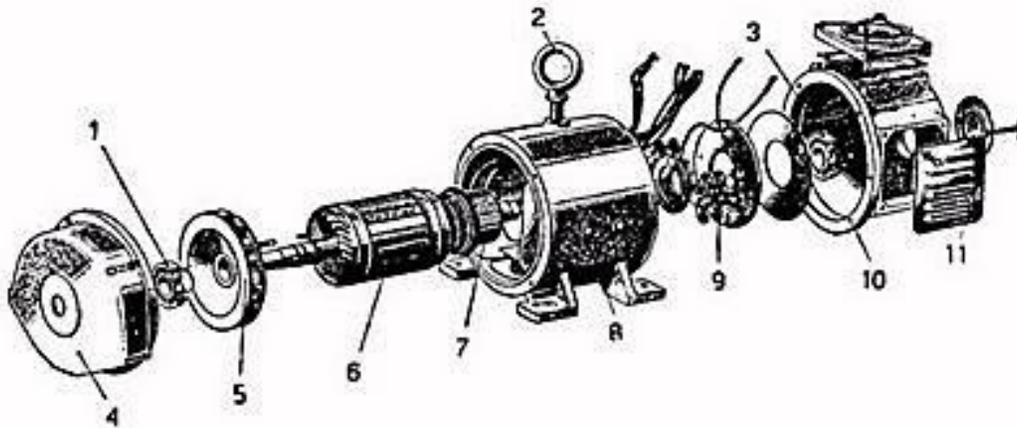
Figura. 3.12.16. Visualización de los campos electromagnéticos, (fase B).

3.12. Material didáctico*:

1. <http://www.tuveras.com/maquinasca/maquinasca.htm>
2. <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono1.htm>
3. <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono2.htm>
4. <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono3.htm>
5. <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono4.htm>
6. <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono5.htm>
7. <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono6.htm>
8. <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono7.htm>
9. <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono9.htm>
10. <http://www.youtube.com/watch?v=Vq06IUci05w>

4.- MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA.

4.1. ESTRUCTURA:



- | | |
|------------------------------------|---|
| 1. Cojinetes. | 2. Argolla para levantar motor. |
| 3. Rodamientos o cojinetes. | 4. Escudo. |
| 5. Turbina de ventilación. | 6. Devanado inducido (rotor de la máquina). |
| 7. Colector de delgas. | 8. Devanado inductor (estator de la máquina). |
| 9. Escobillas y portaescobillas. | 10. Brida soporte colector. |
| 11. Tapa de la caja de conexiones. | 12. Devanado auxiliar. |

Figura. 4.1. Estructura de un motor de corriente directa.

4.2. FUNCIONAMIENTO:

FUERZA CONTRAELECTROMOTRIZ.

Los motores de corriente directa se construyen del mismo modo que los generadores; por consiguiente, una máquina de cd puede operar como motor o como generador. Para ilustrar. Lo anterior, considere un generador de cd en el que la armadura, inicialmente en reposo, está conectada a una fuente de cd E_s por medio de un interruptor (fig. 4.2.1). La armadura tiene una resistencia R y el campo magnético es creado por un juego de imanes permanentes.

En cuanto se cierra el interruptor, una gran corriente fluye en la armadura porque su resistencia es muy baja. Los conductores individuales de la armadura de inmediato se someten a una fuerza porque están inmersos en el campo magnético creado por los imanes permanentes. Estas fuerzas se suman para producir un poderoso par o momento de torsión que hace girar la armadura.

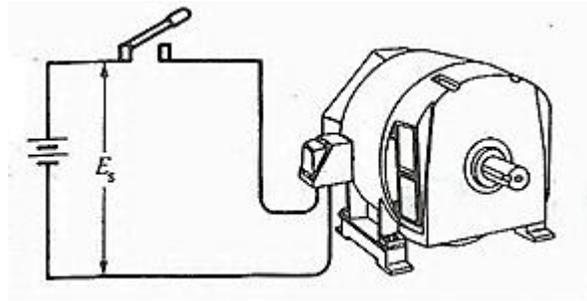


Figura. 4.2.1.

Arranque de un motor de cd a través de la línea.

Por otra parte, en cuanto, la armadura comienza a girar, ocurre un segundo fenómeno: el efecto de generador. Sabemos que un voltaje E_0 es inducido en los conductores de la armadura en cuanto estos atraviesan un campo magnético (fig. 4.2.2.). Esto siempre es cierto, sin importar que provoque la rotación. El valor y la polaridad del voltaje inducido son los mismos que los obtenidos cuando la máquina opera como generador. Por lo tanto, el voltaje inducido E_0 es proporcional a la velocidad de rotación n del motor y al flujo Φ por polo, como vinimos en la ecuación (4.1):

$$E_0 = Zn\Phi/60 \quad (4.1)$$

Como en el caso de un generador, Z es una constante que depende del número de vueltas en la armadura y del tipo de devanado. En el caso de devanados imbricados o de lazo, Z es igual al número de conductores de la armadura.

En el caso de un motor, el voltaje inducido E_0 se conoce como *fuerza contraelectromotriz* (fcem) porque su polaridad siempre actúa contra el voltaje de la fuente E_s . Actúa contra el voltaje en el sentido de que el voltaje neto que actúa en el circuito en serie de la figura (4.2.2), es igual a $(E_s - E_0)$ volts y no a $(E_s + E_0)$ volts.

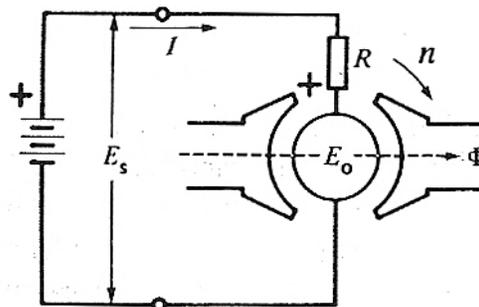


Figura.4.2.2.

Fuerza contraelectromotriz (fcem) en un motor de cd.

Aceleración del motor.

El voltaje neto que actúa en el circuito de la armadura en la figura (4.2.2) es $(E_s - E_0)$ volts. La corriente resultante I en la armadura esta limitada solo por la resistencia R de esta, por lo que.

$$I = (E_s - E_0)/R \quad (4.2)$$

Cuando el motor está en reposo, el voltaje inducido $E_0 = 0$, por lo que la corriente de arranque es

$$I = E_s/R$$

La corriente de arranque puede ser 20 o 30 veces mayor que la corriente a plena carga nominal del motor. En la práctica, esto haría que los fusibles se quemaran o que los cortacircuitos o sistemas de protección se activaran. Sin embargo, si están ausentes, las grandes fuerzas que actúan en los conductores de la armadura producen un poderoso par o momento de torsión de arranque y, en consecuencia, una rápida aceleración de la armadura.

Conforme se incrementa la velocidad, la fcm E_0 también se incrementa, lo que provoca que el valor de $(E_s - E_0)$ disminuya. De la ecuación (4.2) deducimos que la corriente I en la armadura disminuye progresivamente a medida que se incrementa la velocidad.

Aun cuando la corriente en la armadura disminuye, el motor continúa acelerándose hasta que alcanza una velocidad máxima definida. Sin carga, esta velocidad produce una fcm E_0 un poco menor que el voltaje de la fuente E_s . De hecho, si E_0 fuera igual a E_s , el voltaje neto $(E_s - E_0)$ sería cero, por lo que la corriente I también sería cero. Las fuerzas impulsoras dejarían de actuar en los conductores de la armadura y la resistencia mecánica impuesta por el ventilador y los cojinetes harían que el motor se desacelerara de inmediato. A medida que disminuye la velocidad, el voltaje neto $(E_s - E_0)$ aumenta y también la corriente I . La velocidad dejara de disminuir en cuanto el par o momento de torsión desarrollado por la corriente en la armadura sea igual al par o momento de torsión de la carga. De este modo, cuando un motor funciona sin carga, la fcm debe ser un poco menor que E_s , como para permitir que fluya una pequeña corriente, suficiente para producir el par o momento de torsión requerido.

Ejemplo:

La armadura de un generador de cd de imán permanente tiene una resistencia de 1Ω y genera un voltaje de 50 V cuando la velocidad es de 500 r/min. Sin la armadura esta conectada a una fuente de 150 V, calcule lo siguiente:

- La corriente de arranque.
- La fcm cuando el motor gira a 1000 r/min. A 1460 r/min.
- La corriente en la armadura a 1000 r/min. A 1460 r/min.

Solución.

- a. Al momento de arrancar, la armadura está inmóvil, así que $E_0 = 0 \text{ V}$ (fig. 4.2.3a). la corriente de arranque está limitada solo por la resistencia de la armadura:

$$I = \frac{E_s}{R} = 150 \frac{\text{V}}{1\Omega} = 150 \text{ A}$$

- b. Como el voltaje del generador es de 50 V a 500 r/min, la fcm del motor será de 100 V a 1000 r/min y de 146 V a 1460 r/min.

- c. El voltaje neto en el circuito de la armadura a 1000 r/min es:

$$E_s - E_0 = 150 - 100 = 50 \text{ V}$$

La corriente correspondiente en la armadura es:

$$I = \frac{E_s - E_0}{R} = \frac{50}{1} = 50 \text{ A (fig. 4.2.3b)}$$

Cuando la velocidad del motor sea de 1460 r/min, la fcm será de 146 V, casi igual al voltaje de la fuente. Estas condiciones, la corriente en la armadura es:

$$I = \frac{E_s - E_0}{R} = \frac{(150 - 146)}{1} = 4 \text{ A}$$

Y el par o momento de torsión correspondiente en el motor es más pequeño que antes (fig. 4.2.3c).

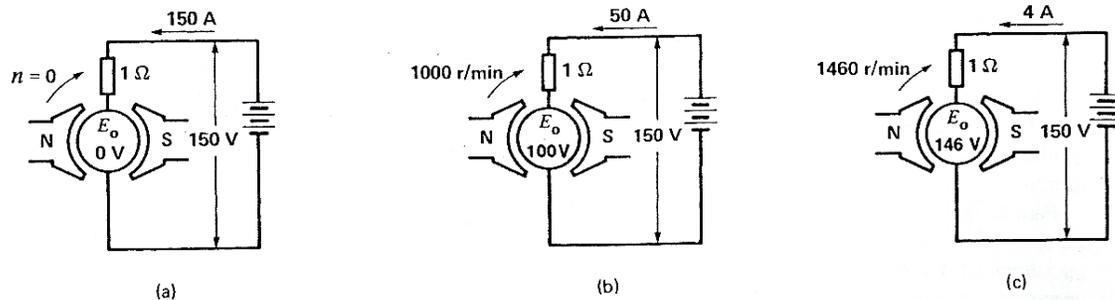


Figura. 4.2.3.

Potencia y par o momento de torsión mecánicos.

La potencia y el par o momento de torsión de un motor de cd son dos de sus propiedades más importantes. A continuación derivaremos dos ecuaciones simples que nos permitirán calcularlas.

- De acuerdo con la ecuación (4.3) la fcm inducida en una armadura de devanado imbricado o de lazo es:

$$E_0 = Zn\Phi/60 \quad (4.3)$$

En la figura (4.2.2). Se ve que la potencia eléctrica P_a suministrada a la armadura es igual

al voltaje de suministro E_s multiplicado por la corriente I en la armadura:

Máquinas eléctricas.

$$P_a = E_s I \quad (4.4)$$

Sin embargo, E_s es igual a la suma de E_0 más la caída IR en la armadura:

$$E_s = E_0 + IR \quad (4.5)$$

Deducimos que:

$$P_a = E_s I = (E_0 + IR)I = E_0 I + I^2 R \quad (4.6)$$

El término $I^2 R$ representa el calor disipado en la armadura, pero el muy importante término $E_0 I$ es la potencia eléctrica que es convertida en potencia mecánica. Por lo tanto, la potencia mecánica del motor es exactamente igual al producto de la fem multiplicada por la corriente en la armadura.

4.3. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR C.D.

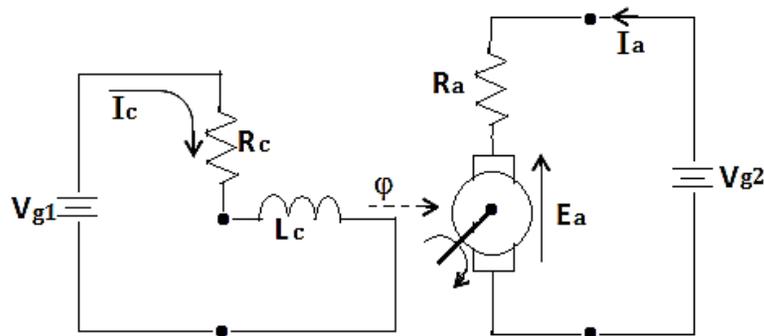


Figura. 4.3.1. Circuito equivalente de un motor C.C.

El circuito equivalente del motor C.C., mostrado en la Figura 4.3.1, se divide en dos partes: El circuito de excitación (izquierda) que genera el campo magnético inmóvil al que se expone el rotor; y el circuito motriz (derecha) en el que se representa al rotor (o armadura) como una fuente de tensión E_a .

La interacción entre ambos circuitos queda descrita por las siguientes ecuaciones:

$$E_a = G \cdot \omega_r \cdot I_c$$

$$T = G \cdot I_c \cdot I_a$$

Donde E_a es el voltaje de armadura, G es un parámetro de la máquina llamado inductancia rotacional, ω_r es la velocidad de giro del rotor y T es el torque generado. Finalmente I_c e I_a son las corrientes de excitación y de armadura, respectivamente.

Al ser R_a relativamente pequeña, se puede ver que la velocidad de giro depende fuertemente del voltaje de armadura E_a y de la corriente de excitación I_c . Sin embargo, para este trabajo se utilizan motores de imanes permanentes, por lo que el término I_c se considera constante.

El torque generado es directamente proporcional a la corriente de armadura, mientras que la presencia de R_a imposibilita un control directo y preciso de velocidad a través del voltaje aplicado a la armadura a pesar de su fuerte dependencia.

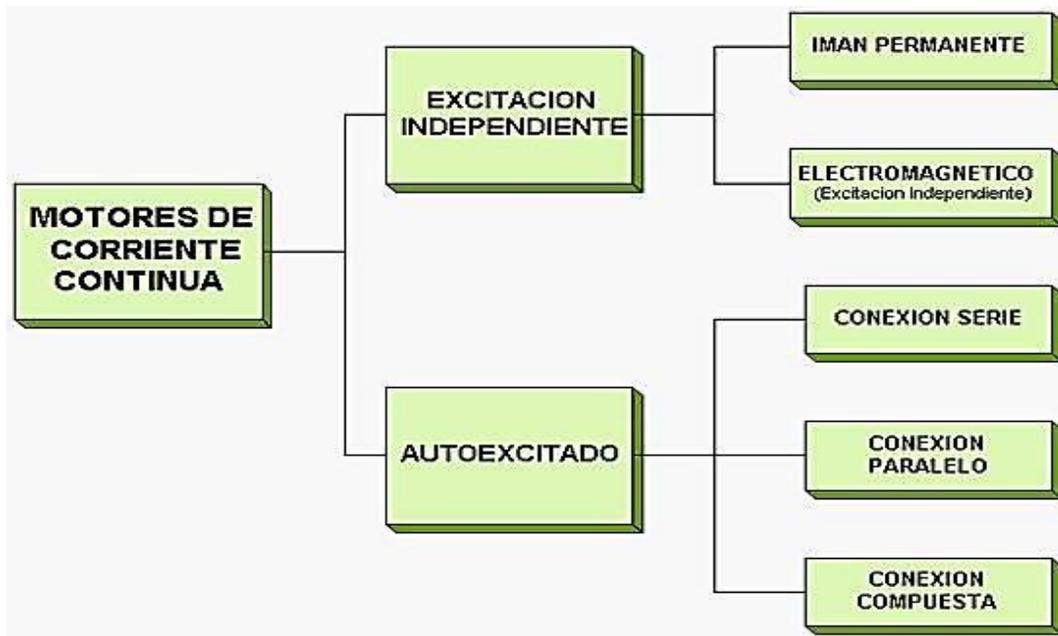


Figura. 4.3.2. Tipos de motores de corriente continua.

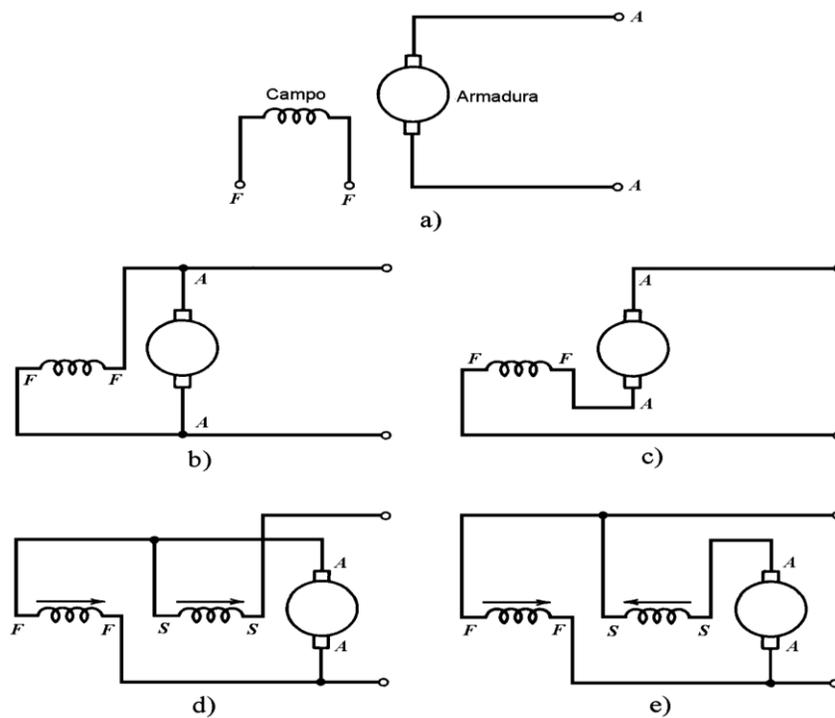


Figura. 4.3.3: Conexiones de algunas máquinas de corriente continua: **a)** De excitación independiente; **b)** Shunt; **c)** Serie; **d)** Compuesta acumulativa; **e)** Compuesta diferencial.

4.4. Motor con excitación independiente.

El motor de excitación independiente es el más adecuado para cualquier tipo de regulación, por la independencia entre el control por el inductor y el control por el inducido. El sistema de excitación más fácil de entender es el que supone una fuente exterior de alimentación para el arrollamiento inductor. En la siguiente figura, se representa el inducido por un círculo; la flecha recta interior representa el sentido de la corriente principal y la flecha curva, el sentido de giro del inducido; el arrollamiento inductor o de excitación, se representa esquemáticamente, y el sentido de la corriente de excitación, por medio de una flecha similar.

Esta máquina se caracteriza por tener su campo conectado en forma separada en donde la corriente de campo se suministra mediante una fuente externa.

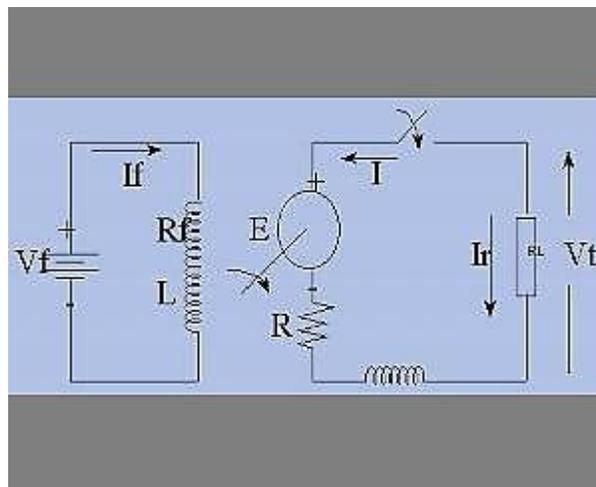


Figura. 4.4.1.

Son aquellos que obtienen la alimentación del rotor y del estator de dos fuentes de tensión independientes. Con ello, el campo del estator es constante al no depender de la carga del motor, y el par de fuerza es entonces prácticamente constante. Las variaciones de velocidad al aumentar la carga se deberán sólo a la disminución de la fuerza electromotriz por aumentar la caída de tensión en el rotor. Este sistema de excitación no se suele utilizar debido al inconveniente que presenta el tener que utilizar una fuente exterior de corriente.

Los motores de excitación independiente tienen como aplicaciones industriales el torneado y taladrado de materiales, extrusión de materiales plásticos y goma, ventilación de horno, retroceso rápido en vacío de ganchos de grúas, desenrollado de bobinas y retroceso de útiles para serrar.

4.5. Motor auto excitable.

Los devanados del inducido e inductor están conectados y alimentados por una fuente común.

4.5.1. Motor en derivación (shunt) bajo carga.

Considere un motor que funciona sin carga. Si se aplica repentinamente una carga mecánica al eje, la pequeña corriente sin carga no produce un par o momento de torsión suficiente para soportar la carga y el motor comienza a desacelerarse. Esto hace que la f_{cm} disminuya y el resultado es una corriente más alta y un par o momento de torsión correspondiente más alto. Cuando el par o momento de torsión desarrollado por el motor es exactamente igual al par o momento de torsión impuesto por la carga mecánica, entonces, y solo entonces, la velocidad permanecerá constante. En resumen, conforme la carga mecánica se incrementa, la corriente en la armadura aumenta y la velocidad disminuye.

La velocidad de un motor en derivación permanece relativamente constante al funcionar sin carga y pasar a plena carga. En motores pequeños, solo disminuye de 10 a 15 % cuando se aplica la carga completa. En máquinas grandes, la disminución es incluso menor, debido en parte a la bajísima resistencia de la armadura. Ajustando el reóstato de campo, se puede mantener la velocidad absolutamente constante a medida que cambia la carga.

En la figura (4.5.1.1) se muestran las características típicas de par o momento de torsión-velocidad y momento de torsión-corriente de un motor en derivación. La velocidad, el par o momento de torsión y la corriente se dan en valores por unidad. El par o momento de torsión es directamente proporcional a la corriente en la armadura. Además, la velocidad cambia solo de 1.1 a 0.9 p.u. a medida que el par o momento de torsión se incrementa de 0 a 2 p.u. (valor por unidad).

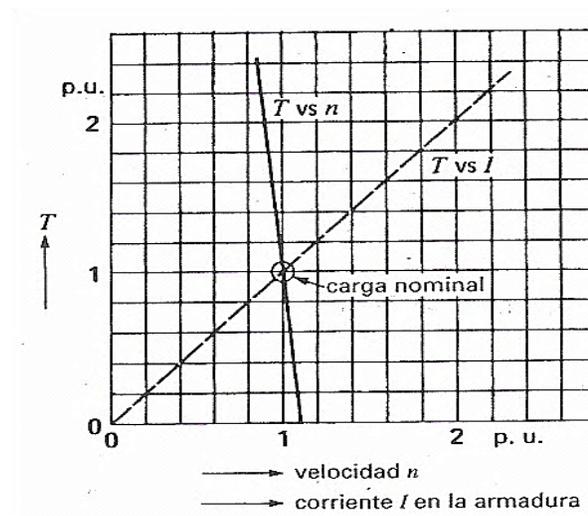


Figura. 4.5.1.1. Características de par o momento de torsión-velocidad y par o momento de torsión-corriente de un motor en derivación.

Ejemplo 4.5.1. Un motor en derivación que gira a 1500 r/min es alimentado por una fuente de 120 V (fig.4.5.1.2a). La corriente de línea es de 51 A y la resistencia del campo en derivación es de 120Ω . Si la resistencia de la armadura es de 0.1Ω , calcule lo siguiente:

- La corriente en la armadura
- La f_{cem}
- La potencia mecánica desarrollada por el motor.

Solución:

- La corriente en el campo (fig. 4.5.1.2b) es $I_x = 120 \frac{V}{120\Omega} = 1 A$

La corriente en la armadura es $I = 51 - 1 = 50 A$

- El voltaje en la armadura es $E = 120 V$

La caída de voltaje provocada por la resistencia de la armadura es

$$IR = 50 \times 0.1 = 5V$$

La f_{cem} generada por armadura es: $E_0 = 120 - 5 = 115 V$

- La potencia total suministrada al motor es $P_i = EI = 120 \times 51 = 6120 W$

La potencia absorbida por la armadura es $P_a = EI = 120 \times 50 = 6000 W$

La potencia disipada en la armadura es $P = IR^2 = 50^2 \times 0.1 = 250 W$

La potencia desarrollada por la armadura es

$$P = 6000 - 250 = 5750 W \text{ (Equivalente a } 5750/746 = 7.7 \text{ hp)}$$

La producción mecánica neta de salida es un poco menor a 5750 W porque una parte de la potencia mecánica se disipa en pérdidas por fricción en los cojinetes, por fricción con el aire y en pérdidas en el hierro de la armadura.

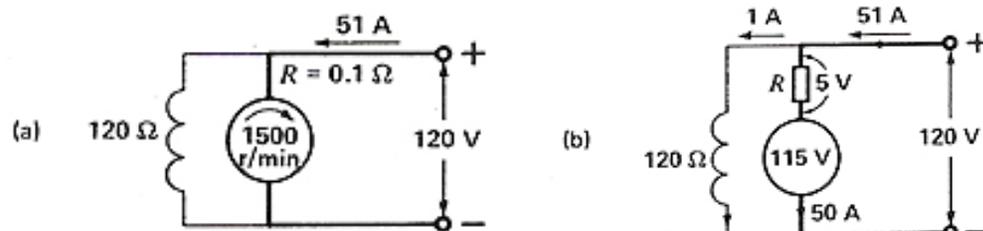


Figura. 4.5.1.2.

4.5.2. Motor en serie.

Un motor en serie se construye de la misma manera que un motor en derivación, excepto por lo referente al campo. El campo está conectado en serie a la armadura, por lo que debe transportar toda la corriente de la armadura (fig.4.5.2.1a). Este campo en serie se compone de unas cuantas vueltas de alambre que tiene una sección transversal suficientemente grande para transportar la corriente.

Aunque la construcción es similar, las propiedades de un motor en serie son completamente diferentes a las de un motor en derivación. En un motor en derivación el flujo F por polo es constante para todas las cargas porque el campo en derivación está conectado a la línea. Pero en un motor en serie el flujo por polo depende de la corriente en la armadura y, por consiguiente, de la carga. Cuando la corriente es grande, el flujo es grande y viceversa. A pesar de estas diferencias, los mismos principios y ecuaciones básicos aplican a ambas máquinas.

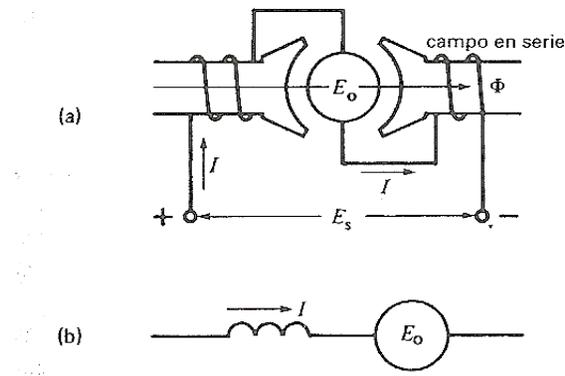


Figura. 4.5.2.1. (a). Diagrama de conexión de un motor en serie. (b). Diagrama esquemático de un motor en serie.

Cuando un motor en serie opera a plena carga, el flujo por polo es igual que el de un motor en derivación de potencia y velocidad idénticas. Sin embargo, cuando el motor en serie arranca, la corriente en la armadura es más alta que la normal, lo que da como resultado que el flujo por polo también sea mayor que el normal. Se deduce que el par o momento de torsión de arranque de un motor en serie es considerablemente mayor que el de un motor en derivación. Esto se puede apreciar comparando las curvas T con las I de las figuras (4.5.1.1) y (4.5.2.2).

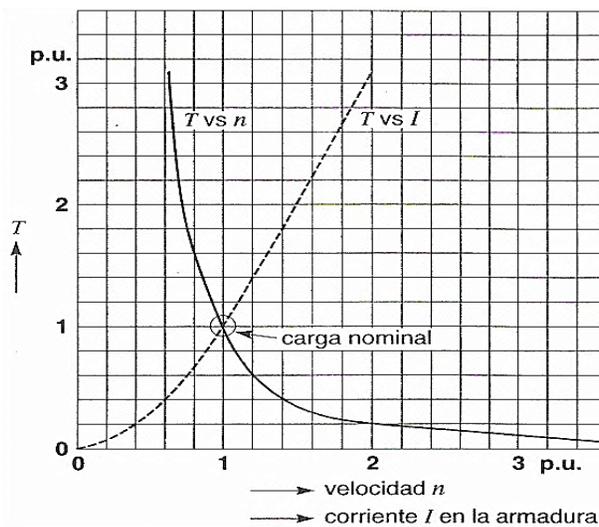


Figura 4.5.2.2. Curvas características típicas de par-velocidad y par-corriente de un motor.

Por otra parte, si el motor opera con una carga menor que la plena, la corriente en la armadura y el flujo por polo son menores que los normales. El campo más débil eleva la velocidad del mismo modo que lo haría en un motor en derivación con un campo en derivación débil. Por ejemplo, si la corriente de carga de un motor en serie cae a la mitad, por lo que la velocidad se duplica. Obviamente, si la carga es pequeña, la velocidad puede elevarse a valores peligrosamente altos. Por esta razón, nunca se permite que un motor en serie opere sin carga. Tiende a embalsarse y las fuerzas centrífugas resultantes podrían arrancar los devanados de la armadura y destruir la máquina.

4.5.3. Motor compuesto.

Un motor de cd compuesto tiene tanto un campo en serie como uno en derivación. En un motor compuesto acumulativo, la fmm de los dos campos se suma. El campo en derivación siempre es más fuerte que el campo en serie.

La figura (4.5.3.1) muestra la conexión y los diagramas esquemáticos, de un motor compuesto. Cuando el motor funciona sin carga, la corriente I en el devanado en serie de la armadura es baja y la fmm del campo en serie es mínima. Sin embargo, el campo en derivación es excitado completamente por la corriente I_x , por lo que el motor se comporta como una máquina en derivación: no tiende a embalsarse sin carga.

Cuando la carga se incrementa, la fmm del campo en serie también se incrementa, pero la del campo en derivación permanece constante. Por lo tanto, la fmm total (y el flujo por polo resultante) es mayor con carga que sin carga. La velocidad del motor disminuye con la carga en aumento y la reducción de la velocidad al estar sin carga y pasar a plena carga en general es de 10 a 30%.

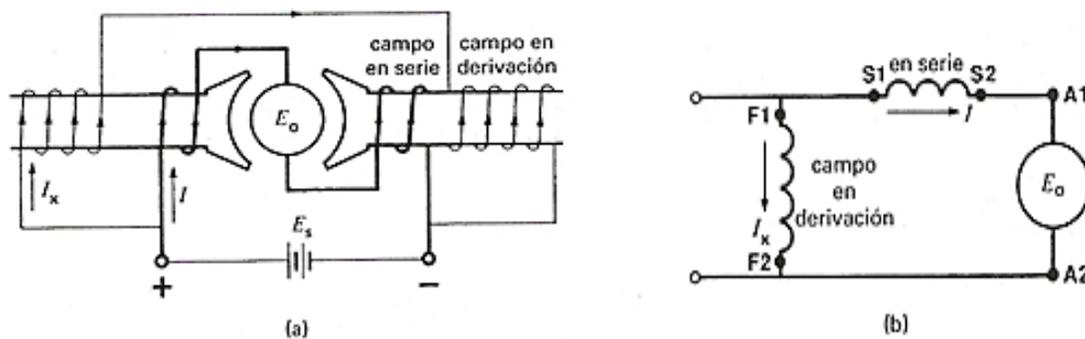


Figura. 4.5.3.1. (a) Diagrama de conexión de un motor de cd compuesto. (b) Diagrama esquemático del motor.

Si conectamos el campo en serie de modo que se oponga al campo en derivación, obtenemos un motor compuesto diferencial. En un motor como este, la fmm total disminuye conforme se incrementa la carga. La velocidad aumenta a medida que se incrementa la carga, y esto puede causar inestabilidad. El motor compuesto diferencial tiene muy pocas aplicaciones.

La figura (4.5.3.2) muestra las curvas típicas de par o momento de torsión-velocidad de motores en derivación, compuestos y en serie, basadas en valores por unidad.

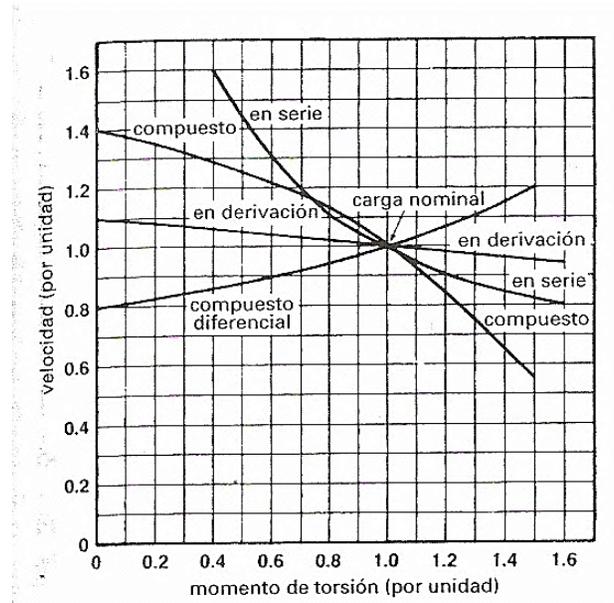


Figura. 4.5.3.2.

Características típicas de velocidad frente a momento de torsión de varios motores de cd.

4.6. Diagrama de separación de flujo de potencia para motor de cd*.

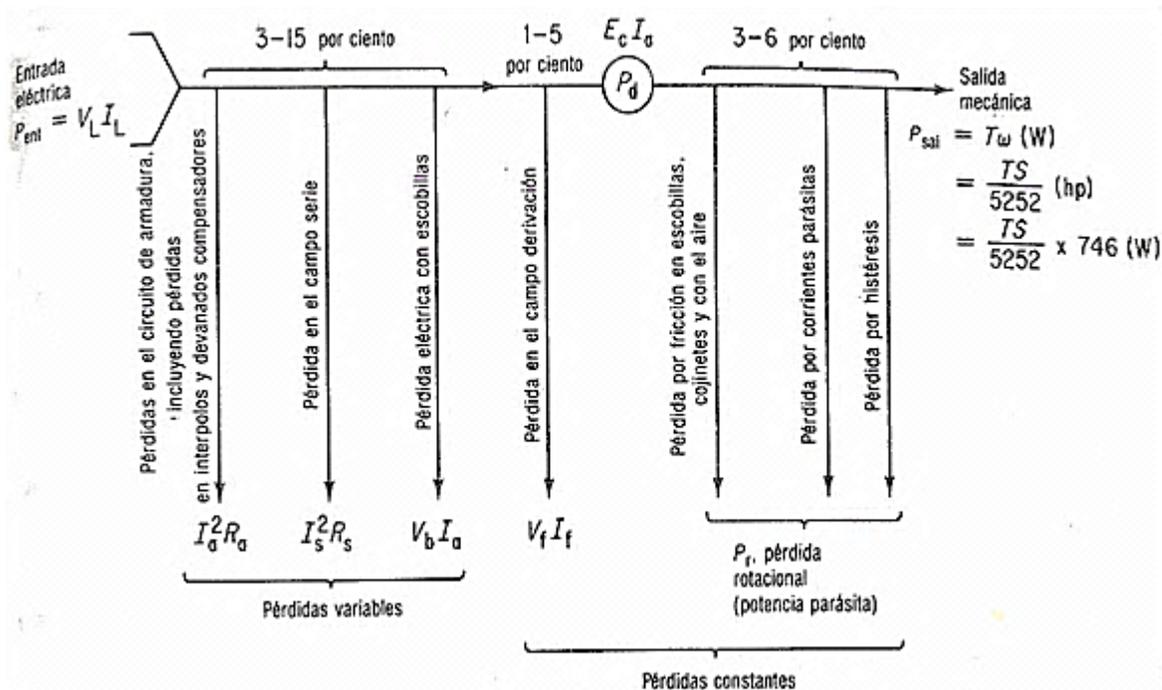


Figura. 4.6.1. Separación de flujo de potencia para las pérdidas de un motor de cd.

4.7. CAMBIO DE DIRECCION EN MOTORES DE C.D.*.

En el caso del motor serie de C.D., la dirección del motor se puede invertir, ya sea cambiando la dirección de la corriente de la armadura o la corriente de campo.

De la misma forma, para un motor en conexión derivado o shunt, la dirección del motor se puede cambiar ya sea cambiando la dirección de la corriente de la armadura o la corriente de campo. En el caso de un motor con conexión compound (compuesta), la dirección de rotación se puede obtener cambiando la dirección de la corriente de armadura o bien de ambas corrientes de campo, es decir, los devanados serie y derivado.

Sin embargo, lo normal en la industria es cambiar la dirección de la corriente de armadura, manteniendo sin cambio la dirección. Como se muestra en la siguiente figura, en la caja de terminales del motor, el cable del arrancador se cambia de A a AA y el puente de interconexión se cambia de Y a AA.

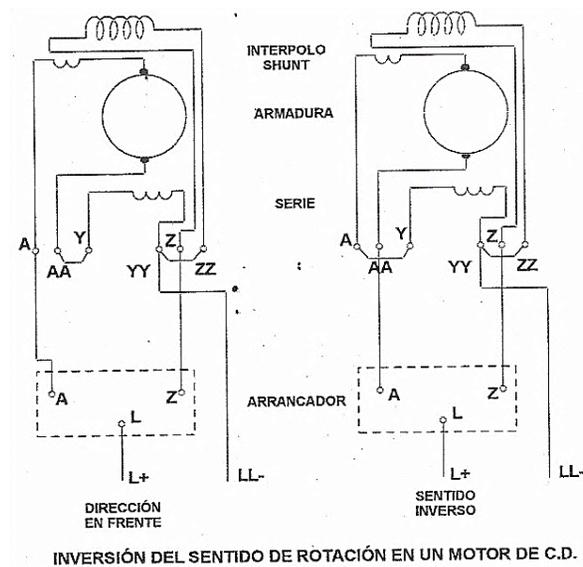


Figura. 4.7.1.

Inversión de la dirección de rotación.

Para invertir la dirección de rotación de un motor de cd, debemos invertir (1) las conexiones de la armadura o (2) tanto las conexiones del campo en serie como las del campo en derivación. Se considera que los interpolos forman parte de la armadura. El cambio de las conexiones se muestra en la figura (4.7.2).

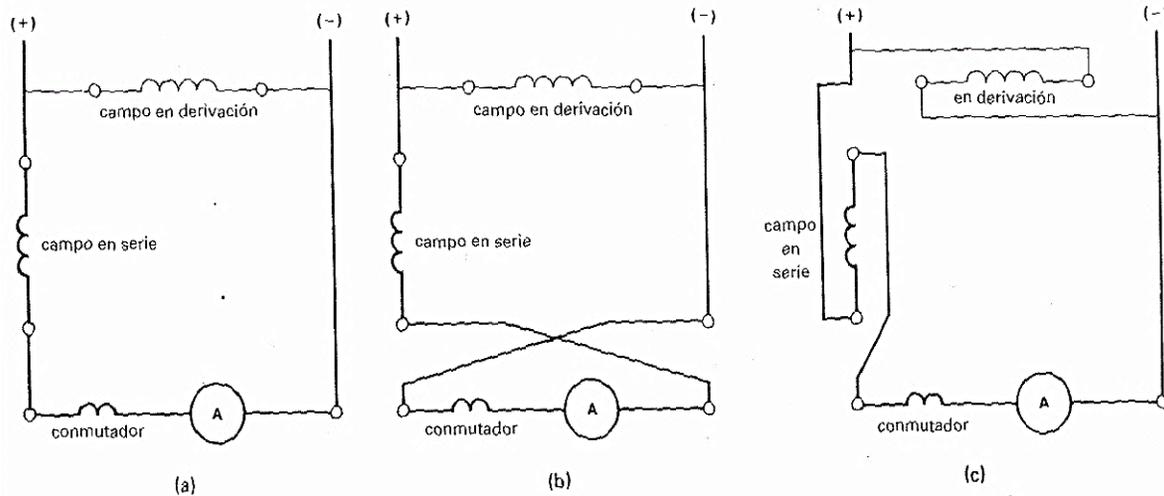


Figura. 4.7.2.

- Conexiones originales de un motor compuesto.
- Inversión de las conexiones de la armadura para invertir la dirección de rotación.
- Inversión de las conexiones del campo para invertir la dirección de rotación.

4.8. Arrancador de reóstato manual*.

La figura (4.8.1) muestra el diagrama esquemático de un arrancador de reóstato manual de un motor en derivación. También podemos ver contactos de cobre descubiertos conectados a los resistores limitadores de corriente $R_1, R_2, R_3, y R_4$. El brazo conductor 1 pasa a través de los contactos cuando es jalado hacia la derecha por medio de una manija aislada 2. En la posición mostrada, el brazo toca el contacto de cobre M sin corriente y el circuito del motor está abierto. Conforme se mueve la manija a la derecha, el brazo conductor toca primero el contacto fijo N.

El voltaje de suministro E_s hace que fluya inmediatamente toda la corriente de campo I_x , pero la corriente I en la armadura es limitada por los cuatro resistores de la caja de arranque. El motor comienza a girar y, a medida que se incrementa la $f_{cem} E_0$, la corriente en la armadura disminuye gradualmente. Cuando la velocidad del motor ya no aumenta, el brazo es jalado al siguiente contacto, con lo que se elimina el resistor R_1 del circuito de la armadura. La corriente salta de inmediato a un valor más alto y el motor se acelera con rapidez a la siguiente velocidad más alta. Cuando la velocidad se nivela de nuevo, nos movemos al siguiente contacto, y así sucesivamente, hasta que finalmente el brazo toca el último contacto. El brazo es magnéticamente mantenido en esta posición mediante un pequeño electroimán 4, el cual está en serie con el campo en derivación. Si el voltaje de suministro se interrumpe de repente, o si la excitación del campo se interrumpe por accidente, el electroimán libera el brazo y permite que regrese a su

posición muerta, por el tirón del resorte 3. Esta característica de seguridad evita que el motor vuelva a arrancar inesperadamente cuando el voltaje de suministro se restablece.

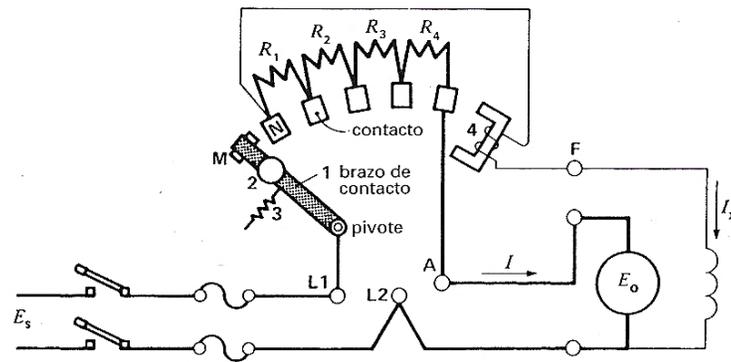


Figura. 4.8.1.

Arrancador de reóstato manual de un motor en derivación.

4.9. EJERCICIOS*:

4.9.1. Un motor de corriente continua de excitación derivación de 25 hp, 220 V, 90 A, 1400 rpm, tiene una corriente en el devanado de campo 1 A. la resistencia de armadura es de 0.1Ω . Se considera una caída de tensión por contacto de escobillas con colector de 1 V, calcular:

- Valor de f.c.e.m.
- Eficiencia.

Datos:

$$v_i = 220 \text{ v}$$

$$I_F = 1 \text{ A}$$

$$I_i = 90 \text{ A}$$

$$E_c = 1 \text{ V}$$

$$P = 25 \text{ hp}$$

$$\begin{aligned} \text{a) } I_i &= I_a + I_F \Rightarrow I_a = I_i - I_F \\ I_a &= 90 - 1 \\ I_a &= 89 \text{ A} \\ v_i &= E_g + I_a R_a + E_c \Rightarrow \\ E_g &= V_i - I_a R_a - E_c \\ E_g &= 220 \text{ V} - (89)(0.1) - 1 = \mathbf{210.1 \text{ V}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } P_{abs} &= (V_i)(I_i) = (220) = \mathbf{19800 W} \\ P_{util} &= (25)(746) = \mathbf{18650 W} \\ \eta &= \frac{P_{util}}{P_{abs}} = \frac{P_s}{P_E} = \frac{18650 W}{19800 W} = \mathbf{94\%} \end{aligned}$$

4.9.2. Un motor en derivación tiene una f.c.e.m. de 117 V con una resistencia en inducido de 0.2Ω , una caída de tensión por contacto de escobilla con colector de 2 V. si se conecta a una tensión de 120 V, calcular:

- La corriente de la armadura.
- Si la resistencia del inducido cambia a 0.8Ω , 1.2Ω y 1.8Ω , calcular corriente.
- Si en la armadura se conecta un devanado auxiliar de resistencia 2Ω calcular la corriente de la armadura.

Datos:

$$E_g = 117 V$$

$$E_c = 2 V$$

$$V_\ell = 120 V$$

$$R_a = 0.2 \Omega$$

Solución:

- Corriente de la armadura:

$$V_\ell = E_g + I_a R_a + E_c, \text{ despejando } \Rightarrow I_a R_a = V_\ell - E_g - E_c$$

$$I_a = \frac{V_\ell - E_g - E_c}{R_a}$$

$$I_a = \frac{120 - 117 - 2}{0.2} = 5 A.$$

- Si la resistencia del inducido cambia a 0.8Ω , 1.2Ω y 1.8Ω .

$$I_a = \frac{120 - 117 - 2}{0.8} = 1.25 A.$$

$$I_a = \frac{120 - 117 - 2}{1.2} = 0.83 A.$$

$$I_a = \frac{120 - 117 - 2}{1.8} = 0.55 A.$$

- Si en la armadura se conecta un devanado auxiliar de resistencia 2Ω . Calcular la corriente de la armadura.

$$I_a = \frac{120 - 117 - 2}{2.0} = 0.5 A.$$

4.9.3. Un motor en serie de corriente continua tiene de resistencia de los devanados 0.4Ω . la f.c.e.m generada en el inducido es de 210 V y la tensión en bornes 230 V. despreciando la caída de tensión en las escobillas, calcular:

- Intensidad de corriente que consume la red.
- potencia absorbida.
- potencia desarrollada.

Datos:

$$R_a = 0.4\Omega$$

$$E_g = 210 \text{ V}$$

$$V_i = 230 \text{ V}$$

- $$V_i = E_g + R_a I_a + E_c$$

$$I_a = \frac{V_i - E_g - E_c}{R_a} = \frac{230 - 210 - 0}{0.4} = \mathbf{50 \text{ A}}$$
- $$P_{ab} = (V_i)(I_a)$$

$$P_{ab} = (230)(50) = \mathbf{11500 \text{ W}}$$
- $$P_{des} = (E_g)(I_a) = (210)(50) = 10500 \text{ W}$$

4.9.4. Un motor serie de corriente continua de 25 hp, 250 V, 600 rpm y 85 A, tiene resistencia de los devanados 0.15Ω . Considerando una caída de tensión por contacto de escobilla con colector de 1.5 V, calcular para el funcionamiento a plena carga:

- Valor de la f.c.e.m.
- potencia absorbida.
- potencia desarrollada.
- Pérdidas.
- Eficiencia.

$$a) V_i = E_g + R_a I_a + E_c$$

$$E_g = V_i - R_a I_a - E_c$$

$$E_g = 250 \text{ V} - (0.15)(85) - 1.5$$

$$E_g = \mathbf{235.75 \text{ V}}$$

$$b). P_{ab} = (V_i)(I_a)$$

$$P_{ab} = (250)(85) = \mathbf{21250 \text{ W}}$$

Máquinas eléctricas.

$$c). P_{des} = (Eg)(I_a) = (235.75)(85) = \mathbf{20038.75 W}$$

$$d) P_{ab} - P_{util} = 21250 - 20038.75 = \mathbf{1211.25 W}$$

$$e) 25 \times 746 = 18650 W$$

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = \frac{18650 W}{21250 W} = \mathbf{87\%}$$

4.9.5. Un motor de excitación compuesta aditiva en conexión corta, de 25 hp, 240 V, 89 A, 600 rev/min tiene una resistencia del devanado inducido 0.03Ω de resistencia del devanado auxiliar de conmutación 0.05Ω y se considera una caída de tensión por contacto de escobilla con colector de 2 V. La resistencia del devanado serie es de 0.02Ω y la del circuito en derivación 158.8Ω . Calcular para el funcionamiento a plena carga:

a) Intensidad en el devanado inductor derivación.

b) Intensidad en el inducido.

c) Rendimiento.

d) Valor de f.c.e.m.

e) Momento útil.

Datos:

$$V_b = 240 V$$

$$P_U = 25 hp$$

$$I = 89 A$$

$$n = 600 \frac{rev}{min}$$

$$r_i = 0.03\Omega$$

$$R_C = 0.05\Omega$$

$$R_d = 158.8\Omega$$

$$R_S = 0.02\Omega$$

$$V_e = 2 V$$

a) Intensidad en el devanado inductor derivación.

$$V_i = I_F R_F + I_S R_S \Rightarrow I_F = \frac{V_i - I_S R_S}{R_F}$$

$$I_F = \frac{(240) - (89)(0.02)}{158.8} = \mathbf{150 A}$$

Máquinas eléctricas.

b) Intensidad en el inducido

$$I_a = I_i - I_f = 89 - 1.50 = \mathbf{87.5 A}$$

c) $P_{ab} = (240)(89) = \mathbf{21360 W}$

$$P_{util} = (25)(746) = \mathbf{18650 W}$$

$$\eta = \frac{P_U}{P_{ab}} = \frac{18650}{21360} = 0.87 \times 100 = \mathbf{87.3\%}$$

d) FCEM

$$E_g = V_i - I_a(R_a + R_c) - I_s R_s - 2Ec$$

$$E_g = 240 V - (87.5)(0.03 + 0.05) - (89)(0.02) - 4$$

$$E_g = \mathbf{227.22 V}$$

e) Momento electromecánico

$$P_d = (227.22)(87.5) = 19881.75 W$$

$$\omega = 600 \frac{rev}{min} \left(\frac{2\pi rad}{1 rev} \right) \left(\frac{1 min}{60 seg} \right) = 20\pi \frac{rad}{seg}$$

$$T_d = \frac{P_d}{\omega} = \frac{19881.75}{20\pi \frac{rad}{seg}} = \mathbf{316.42 N m}$$

f) Momento útil

$$P_U = (25 hp)(746) = \mathbf{18650 W}$$

$$T_U = \frac{P_U}{\omega} = \frac{18650}{20\pi rad/seg} = \mathbf{296.82 N m}$$

4.9.6. Un motor serie de corriente continua de 10 hp, 220 V, 44 A, 1440 rev/min tiene de resistencia de inducido 0.08Ω , devanado de conmutación 0.02Ω , devanado de excitación 0.1Ω . La caída de tensión por contacto de escobilla con colector es de 1 V. Calcular cuando funciona a plena carga:

a) Valor de f.c.e.m.

b) Resistencia del réostato de arranque para que la intensidad de arranque no sea mayor que 1.5 veces la intensidad nominal.

c) Momento de rotación útil.

Datos:

$$P_U = 10 hp$$

$$I = 44 A$$

$$n = 1440 \frac{rev}{min}$$

$$r_i = 0.08\Omega$$

$$R_c = 0.02\Omega$$

Máquinas eléctricas.

$$R_s = 0.1\Omega$$

$$V_e = 1 V$$

$$a) E = V_b - (r_i + R_c + R_s)I - 2V_e$$

$$E = 220 V - 2 V - (0.08\Omega + 0.02\Omega + 0.1\Omega)(44 A) = \mathbf{209.2 V}$$

$$b) R_a = \frac{V_b - 2V_e}{1.5(I)} - (\Sigma R) = \frac{220 V - 2 V}{1.5(44 A)} - (0.08\Omega + 0.02\Omega + 0.1\Omega) = \mathbf{3.10\Omega}$$

$$c) P_U = (10 hp) \left(\frac{746 W}{1 hp} \right) = \mathbf{7460 W}$$

$$\omega = 1440 \frac{rev}{min} \left(\frac{2\pi rad}{1 rev} \right) \left(\frac{1 min}{60 seg} \right) = \mathbf{150.79 \frac{rad}{seg}}$$

$$\tau_{nom} = \tau_U = \frac{P_U}{\omega} = \frac{7460 w}{150.79 rad/seg} = \mathbf{49.47 N m}$$

4.9.7. Un motor de corriente continua de excitación serie se conecta a 110 V. La resistencia de los devanados del motor es de 1.5Ω y la caída de tensión por contacto de escobilla con colector es de 1 V. Calcular la intensidad de corriente absorbida por el motor si la f.c.e.m. engendrada en el inducido es de 78 V.

Datos:

$$V_b = 110 V$$

$$E = 78 V$$

$$\Sigma R = 1.5\Omega$$

$$V_e = 1 V$$

$$I_i = \frac{V_b - E - 2V_e}{\Sigma R} = \frac{110 V - 78 V - 2 V}{1.5\Omega} = 20 A$$

4.9.8. Un motor de corriente continua de excitación serie de resistencia de los devanados 0.2Ω y la caída de tensión por contacto de escobilla con colector es de 1 V. Conectado a 220 V gira a 1000 rev/min consumiendo una corriente de intensidad 10 A y suministrando una potencia mecánica de 2.5 hp. Calcular:

a) Par o momento de rotación electromagnético.

b) Par o momento de rotación útil.

c) Resistencia del reóstato de arranque para que la intensidad en el arranque no sobrepase el doble de la intensidad en marcha normal.

Datos:

$$V_b = 220 \text{ V}$$

$$P_U = 2.5 \text{ hp}$$

$$I = 10 \text{ A}$$

$$n = 1000 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

$$\Sigma R = 0.2 \Omega$$

$$V_e = 1 \text{ V}$$

$$\text{a) } E = V_b - (\Sigma R)I - 2V_e$$

$$E = 220 \text{ V} - 2 \text{ V} - (0.2 \Omega)(10 \text{ A}) = 216 \text{ V}$$

$$P_{em} = EI = (216 \text{ V})(10 \text{ A}) = 2160 \text{ W}$$

$$\omega = 1000 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \left(\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right) = 104.71 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$\tau_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} = \frac{2160 \text{ W}}{104.71 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}} = \mathbf{20.26 \text{ N m}}$$

$$\text{b) } P_U = (2.5 \text{ hp}) \left(\frac{746 \text{ W}}{1 \text{ hp}} \right) = 1865 \text{ W}$$

$$\tau_U = \frac{P_U}{\omega} = \frac{1865 \text{ W}}{104.71 \text{ rad/seg}} = 17.81 \text{ N m}$$

$$\text{c) } R_{arranque} = \frac{V_b - 2V_e}{2I} - (\Sigma R) = \frac{220 \text{ V} - 2 \text{ V}}{2(10 \text{ A})} - (0.2 \Omega) = \mathbf{10.7 \Omega}$$

4.9.9. Un motor de corriente continua de excitación compuesta aditiva en conexión larga conectado a 220 V, consume 38 A y gira a 1200 rev/min tiene una resistencia de inducido de 0.16Ω devanado de conmutación 0.04Ω y devanado de serie 0.1Ω . La caída de tensión por contacto de escobilla con colector es de 1 V. La resistencia del devanado derivación es de 184Ω y la intensidad en el devanado derivación a plena carga 1.1 A. Calcular para el funcionamiento a plena carga:

a) Resistencia necesaria en el reóstato de excitación.

b) Momento electromecánico.

c) Momento útil si suministra potencia de 10 hp.

d) Rendimiento.

e) Resistencia del reóstato de arranque para que la intensidad en el inducido en el momento de arranque no sobrepase el doble de la intensidad del inducido a plena carga.

Datos:

$$V_b = 220 \text{ v}$$

$$P = 10 \text{ hp}$$

$$I = 38 \text{ A}$$

$$I_d = 1.1$$

$$n = 1200 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

$$r_i = 0.16\Omega$$

$$R_c = 0.04\Omega$$

$$R_d = 184\Omega$$

$$R_s = 0.1\Omega$$

$$V_e = 1 \text{ V}$$

$$\text{a) } R_a = \frac{V_b - R_d I_d}{I_d} = \frac{220 \text{ V} - (184\Omega)(1.1 \text{ A})}{1.1 \text{ A}} = \mathbf{16\Omega}$$

$$\text{b) } I_i = I - I_d = 38 \text{ A} - 1.1 \text{ A} = 36.9 \text{ A}$$

$$E = V_b - (r_i + R_c + R_s)I_i - 2V_e$$

$$E = 220 \text{ V} - 2 \text{ V} - (0.16\Omega + 0.04\Omega + 0.1\Omega)(36.9 \text{ A}) = 206.93 \text{ V}$$

$$P_{em} = EI_i = (206.93 \text{ V})(36.9 \text{ A}) = 7635.717 \text{ W}$$

$$\omega = 1200 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \left(\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right) = 125.66 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$\tau_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} = \frac{7635.71 \text{ W}}{125.66 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}} = 60.76 \text{ N m}$$

$$\text{c) } P_U = (10 \text{ hp}) \left(\frac{746 \text{ W}}{1 \text{ hp}} \right) = 7460 \text{ W}$$

$$\tau_U = \frac{P_U}{\omega} = \frac{7460 \text{ W}}{125.66 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}} = \mathbf{59.36 \text{ N m}}$$

$$\text{d) } P_{ab} = V_b I = (220 \text{ V})(38 \text{ A}) = 8360$$

$$\eta = \frac{P_U}{P_{ab}} \times 100\% = \frac{7460 \text{ W}}{8360 \text{ W}} \times 100 = 89.23\%$$

$$\text{e) } R_{arranque} = \frac{V_b - 2V_e}{2I} - (r_i + R_c + R_s)$$

$$R_{arranque} = \frac{220 \text{ V} - 2 \text{ V}}{2(36.9 \text{ A})} - (0.16\Omega + 0.04\Omega + 0.1\Omega) = 2.65\Omega$$

Máquinas eléctricas.

4.9.10. Un motor de corriente continua de excitación derivación de 25 hp, 220 V, 1500 rev/min, tiene una intensidad nominal de excitación 1.5 A. La resistencia de inducido y devanado de conmutación es 0.15Ω y la resistencia del devanado inductor es 140Ω . Se desprecia la caída de tensión por contacto de escobilla con colector. El rendimiento a plena carga es de 86%. Calcular para el funcionamiento a plena carga:

- Intensidad absorbida.
- Resistencia necesaria en el reóstato de regulación de la excitación.
- Valor de la f.c.e.m.
- Resistencia del reóstato de arranque para que la intensidad de arranque en el inducido no sobrepase 1.5 veces la intensidad de plena carga en el inducido.
- Momento (o par) útil.
- Momento electromagnético.

Datos:

$$V_b = 220 \text{ V}$$

$$P_U = 25 \text{ hp}$$

$$I_d = 1.5 \text{ A}$$

$$n = 1500 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

$$R_d = 140\Omega$$

$$r_i + R_c = 0.15\Omega$$

$$\eta = 86\%$$

$$P_U = (25 \text{ hp}) \left(\frac{746 \text{ W}}{1 \text{ hp}} \right) = 18650 \text{ W}$$

$$\text{a) } \eta = \frac{P_U}{P_{ab}} = X100\% \Rightarrow P_{ab} = \frac{P_U}{\eta} = \frac{18650 \text{ W}}{0.86} = 21686.04 \text{ W}$$

$$\therefore I_{abs} = I = \frac{21686.04 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 98.57 \text{ A}$$

$$\text{b) } R_d = \frac{V_b}{I_d} = \frac{220 \text{ V}}{1.5 \text{ A}} = 146.66\Omega \quad R_a = 146.66\Omega - 140\Omega = 6.66\Omega$$

$$I_i = I - I_d = 98.57 \text{ A} - 1.5 \text{ A} = 97.07 \text{ A}$$

$$\text{c) } E = V_b - (r_i + R_c)I_i - 2V_e$$

$$E = 220 \text{ V} - (0.15\Omega)(98.57) = 205.21 \text{ V}$$

$$\text{d) } R_{arranque} = \frac{V_b - 2V_e}{1.5 \text{ A}} - (r_i + R_c) = \frac{220 \text{ V}}{1.5(97.07)} - (0.15\Omega) = 1.36\Omega$$

Máquinas eléctricas.

$$\omega = 1500 \frac{rev}{min} \left(\frac{2\pi rad}{1 rev} \right) \left(\frac{1 min}{60 seg} \right) = 157.07 \frac{rad}{seg}.$$

e) $\tau_U = \frac{P_U}{\omega} = \frac{18650}{157.07 \frac{rad}{seg}} = 118.73 N m$

$$P_{em} = EI_i = (205.21 V)(98.57 A) = 20227.54 W$$

f) $\tau_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} = \frac{20227.54 W}{157.07 \frac{rad}{seg}} = 128.78 N m$

4.9.11. Un motor de derivación trabaja a 1100 rpm, a 230 V consume una corriente de línea de 40 A: La potencia de salida (en la flecha) es de 10.8 hp las diversas pérdidas son:

Pérdidas en el núcleo.	200W.
Pérdidas por fricción y ventilación.	180 W.
Pérdidas eléctricas en las escobillas.	37 W.
Pérdidas adicionales.	37 W.

Las resistencias de los circuitos de armadura y de campo son 0.25Ω y 230Ω respectivamente calcúlese:

- a) La eficiencia del motor.
- b) La velocidad si la potencia de salida se reduce al 50%.

Datos:

$s = 110 rpm$

$p_{util} = 10.8 hp$

$V_i = 230 V$

$I_i = 40 A$

a) $P_{entrada} = (V_i)(I_i) = (230 V)(40 A) = \frac{9200 W}{746 W} = 12.33 hp.$
 $P_{absorbida} = 9200 w$

Pérdidas en la resistencia del campo $\left(\frac{230}{230}\right)^2 (230) =$	+ 230 W.
Pérdidas en la resistencia de la armadura $(40 - 1)^2(0.25) =$	+ 380 W.
Pérdidas en el núcleo.	+ 200 W.
Pérdidas por fricción y ventilación.	+ 180 W.
Pérdidas eléctricas en las escobillas.	+ 37 W.
Pérdidas adicionales.	+ 37 W.
	= 1064 W

$9200W - 1064W = 8136 W$

Máquinas eléctricas.

$$\eta = \frac{8136 \text{ W}}{9200 \text{ W}} \times 100 = \mathbf{88.43\%}$$

b)

$$V_i = I_a R_a + E_g + E_x^0$$

$$E_g = 230 - (39)(0.25) = 220.25 \text{ V}$$

$$220 \text{ V} \cdot 25 = 1100 \text{ rpm}$$

La potencia a la mitad 5.4 hp – 20 A

$$E_g = 230 - (19)(0.25) = 225.25 \text{ V}$$

Regla de tres:

$$220.25 - 1100 \text{ rpm}$$

$$225.25 - 1124.97 \text{ rpm} = \mathbf{1125 \text{ rpm}}$$

4.9.12. Un motor de derivación de 230 V proporciona 30 hp en la flecha a 1120 rpm, si el motor tiene una eficiencia del 87% a esta carga, determine:

a) La potencia absorbida.

b) La corriente de línea.

c) Si el par que se pierde debido a la fricción y ventilación es de 7% del par en la flecha, calcúlese el par desarrollado.

Datos:

$$V_i = 230 \text{ V}$$

$$P_{util} = 30 \text{ hp}$$

$$s = 1120 \text{ rpm}$$

$$\eta = 87\%$$

a)

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_{util}}{P_{abs}} \Rightarrow P_{abs} = \frac{30 \text{ hp}}{0.87} = \mathbf{34.48 \text{ hp}}$$

b) $P_{abs} = V_i I_i$

$$I_i = \frac{P_{abs}}{V_i} = \frac{25722.08 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 111.83 \text{ A}$$

c) $(1200 \text{ rev/min}) \left(\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right) = 117.28 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$

$$\tau_s = \frac{P_s(746)}{\omega}$$

$$\tau_s = \frac{(30)(746)}{117.28 \frac{\text{rad}}{\text{min}}} = 190.82 \text{ N m}$$

$$(190.82)(1.07) = 204.18 \text{ N m} \quad \therefore \tau_o > \tau_s$$

Máquinas eléctricas.

4.9.13. Un motor de 10 Hp, 240 V, tiene una corriente de línea igual a 38 A y una velocidad nominal de 600 rpm. Las resistencias del circuito de armadura y de campo en serie, respectivamente, son 0.4Ω y 0.2Ω . La caída de voltaje en escobillas es 5 V. Suponer que el motor trabaja en la parte lineal de su curva de saturación, por debajo de la corriente nominal de armadura calcular:

- La velocidad cuando la corriente de la carga baja a 20 A a media carga nominal.
- La velocidad sin carga cuando la corriente de línea es 1 A.
- La velocidad a 150% de carga nominal, cuando la corriente de línea es de 60 A y el flujo de campo en serie es 125% del flujo a plena carga, debido a la saturación.

Datos:

$$P_s = 10 \text{ hp.}$$

$$V_i = 240 \text{ V.}$$

$$I_i = 38 \text{ A.}$$

$$s = 600 \text{ rpm.}$$

$$R_a = 0.4\Omega.$$

$$R_s = 0.2\Omega.$$

$$E_c = 5 \text{ V.}$$

$$\text{a) } E_g = 600 \text{ rpm}$$

$$V_i = I_s R_s + I_a R_a + E_g + E_c$$

$$E_g = V_i - I_s R_s - I_a R_a - E_c$$

$$E_g = 240 - (38)(0.2) - (38)(0.4) - 5 = 212.2 \text{ V}$$

$$E_g = 240 - (20)(0.2) - (20)(0.4) - 5 = 223 \text{ V}$$

$$(212.2) = (600)(38)$$

$$(223) = X(20)$$

$$(X)(20)(212.2) = (223)(600)(38) \Rightarrow X = \frac{(223)(600)(38)}{(20)(212.2)} = \mathbf{1198.02 \text{ rpm}}$$

$$\text{b) } E_g = 240 - (1)(0.2) - (1)(0.4) - 5 = 234.4 \text{ V}$$

$$(212.2) = (600)(38)$$

$$(234) = X(1)$$

$$(X)(1)(212.2) = (234.4)(600)(38) \Rightarrow X = \frac{(234.4)(600)(38)}{(1)(212.2)} = \mathbf{25185.29 \text{ rpm}}$$

$$\text{c) } 150\% \quad I_i = 60 \text{ A}$$

$$E_g = 240 - (60)(0.2) - (60)(0.4) - 5 = 199 \text{ V}$$

Regla de tres:

$$212.2 - 600 \text{ rpm (100\%)}$$

Máquinas eléctricas.

$$\frac{(199) - X (125\%)}{1.25} = 450.14 \text{ rpm}$$

4.9.14. Un motor de corriente continua de excitación compuesta diferencial en conexión larga de 15 hp, 220 V, 60 A, 950 rev/min. Tiene una resistencia de inducido de 0.15Ω , devanado de conmutación 0.05Ω y devanado de serie 0.1Ω . La caída de tensión por contacto de escobilla con colector es de 1.2 V. La resistencia del devanado de derivación es de 210Ω y la intensidad en el devanado de derivación a plena carga 1 A. calcular para el funcionamiento a plena carga:

- Resistencia necesaria en el reostato de excitación.
- Momento (o par) electromagnético.
- Momento (o par) útil.
- Resistencia del reostato de arranque para que la intensidad en el inducido en el momento del arranque no sobrepase el doble de la intensidad del inducido a plena carga.

Datos:

$$V_b = 220 \text{ V}$$

$$P = 15 \text{ hp}$$

$$I = 60 \text{ A}$$

$$I_d = 1 \text{ A}$$

$$n = 950 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

$$r_i = 0.15\Omega$$

$$R_c = 0.05\Omega$$

$$R_d = 210\Omega$$

$$R_s = 0.1\Omega$$

$$V_e = 1.2 \text{ V}$$

$$\text{a) } R_a = \frac{V_b - R_d I_d}{I_d} = \frac{220 \text{ V} - (210 \Omega)(1 \text{ A})}{1 \text{ A}} = 10 \Omega$$

$$\text{b) } I_i = I - I_d = 60 \text{ A} - 1 \text{ A} = 59 \text{ A}$$

$$E = V_b - (r_i + R_c + R_s)I_i - 2V_e$$

$$E = 220 \text{ V} - 2.4 \text{ V} - (0.1\Omega + 0.05\Omega + 0.15\Omega)(59 \text{ A}) = 199.9 \text{ V}$$

Máquinas eléctricas.

$$P_{em} = EI_i = (199.9)(59 A) = 11794 W$$

$$\omega = 950 \frac{rev}{min} \cdot \left(\frac{2\pi rad}{1 rev} \right) \left(\frac{1 min}{60 seg} \right) = 99.48 \frac{rad}{seg}.$$

$$\tau_{em} = \frac{p_{em}}{\omega} = \frac{11794.1 W}{99.48 \frac{rad}{seg}} = \mathbf{118.55 N m}$$

$$c) P_u = (15 hp) \left(\frac{746}{1 hp} \right) = 11190 W$$

$$\tau_U = \frac{P_U}{\omega} = \frac{11190 W}{99.48 \frac{rad}{seg}} = \mathbf{112.48 N m}$$

$$d) R_{arranque} = \frac{V_b - 2V_e}{2I} - (r_i + R_c + R_s)$$

$$R_{arranque} = \frac{220 V - 2 V}{2(59 A)} = (0.05\Omega + 0.1\Omega + 0.15\Omega) = \mathbf{1.54\Omega}$$

4.10. Material didáctico*:

1. <http://www.tuveras.com/maquinaselectricas.htm>
2. <http://www.tuveras.com/maquinascc/estructura.htm>
3. <http://www.tuveras.com/maquinascc/conceptosprevios.htm>
4. <http://www.tuveras.com/maquinascc/motor/motor.htm>
5. <http://www.tuveras.com/maquinascc/motor/excitacionmotor.htm>
6. <http://www.tuveras.com/maquinascc/funcionamientos.html>
7. http://www.walter-fendt.de/ph14s/electricmotor_s.htm
8. <http://www.youtube.com/watch?v=Vg06IUci05w>

5.- GENERADORES DE CORRIENTE DIRECTA:

5.1. Estructura:

El estator de las máquinas de c.c., llamado también sistema “inductor”, consta de un anillo de culata de acero, de polos principales salientes formados por núcleo polar y expansión polar, de chapa magnética, y del devanado de excitación situado sobre los núcleos polares.

El rotor conocido generalmente como “Inducido”, consta de un cilindro de acero (flecha), sobre el que va montado a presión, el paquete de chapas del rotor en cuyas ranuras se colocan las bobinas del devanado del inducido, y de un colector o conmutador, al que está conectado las terminales de dicho devanado. Cuando la máquina es de gran potencia se dispone también de un ventilador.

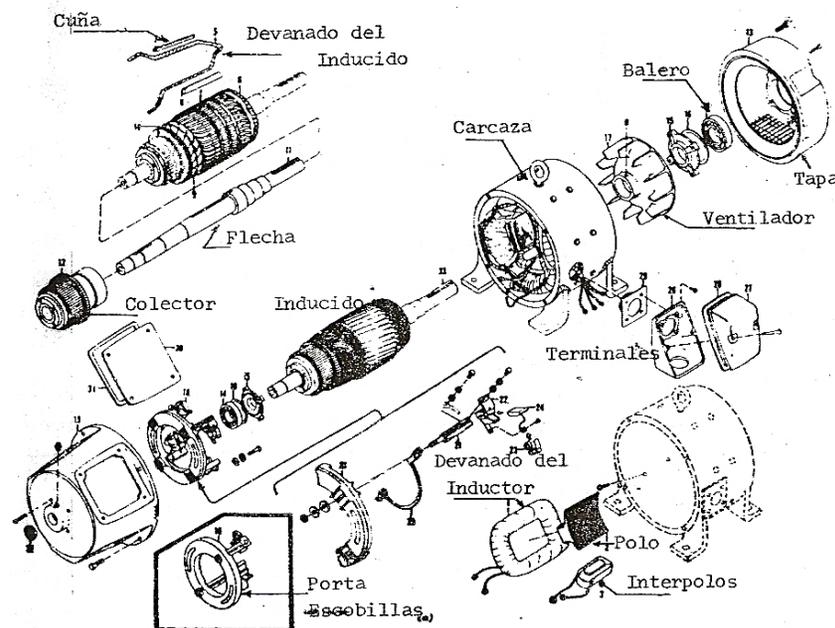


Figura. 5.1.1. Componentes de un generador de C.C.

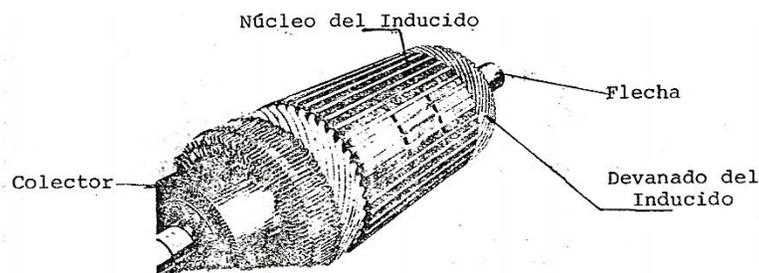


Figura. 5.1.2. Rotor (inducido) de una máquina de C.C.

El colector está formado por segmentos o “delgas” fabricadas de cobre duro y aisladas entre sí. El conjunto se mantiene formado un todo por medio de resina fundida, o de una construcción mecánica a presión.

La unión del devanado del inducido a las delgas del colector se efectúa por soldadura.

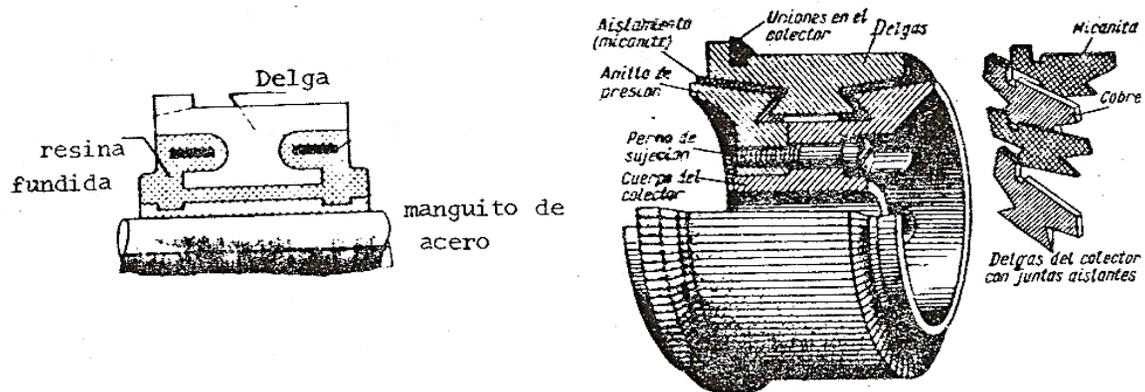


Figura. 5.1.3. Constitución de un colector.

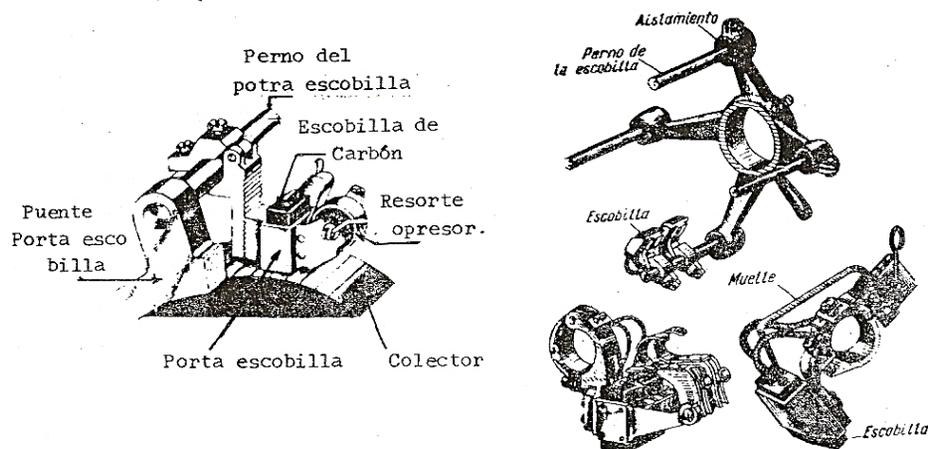


Figura. 5.1.4. Conjunto del porta escobillas.

En la figura (5.1.5.), puede verse una sección de una máquina de c.c., característica simplificada para ilustrar las partes más importantes.

El inducido (rotor) consta de:

1.- El eje del inducido, que permite la rotación del rotor, devanado y colector, y unidos mecánicamente a él están:

2.- El núcleo del inducido, construido a base de laminaciones de acero al silicio para máquinas eléctricas, que proporcionan un camino magnético a baja reluctancia entre polos. Las laminaciones sirven para reducir las corrientes parásitas en el núcleo, y el

Máquinas eléctricas.

acero para máquinas eléctricas utilizado es de tal calidad que determina pérdidas por histéresis reducidas. El núcleo contiene ranuras axiales periféricas para:

3.- El devanado del inducido que consiste en bobinas aisladas entre si y del núcleo del inducido introducidas en las ranuras y conectadas eléctricamente al colector.

1.- Permite la rotación que es necesaria para obtener el efecto del generador o motor.

2.- En virtud de la rotación, produce los efectos necesarios para la conmutación.

3.- Contiene los conductores en los que se induce una f.e.m., o que proporciona un par de fuerzas electromagnéticas.

4.- Proporciona un camino de baja reluctancia para el flujo magnético.

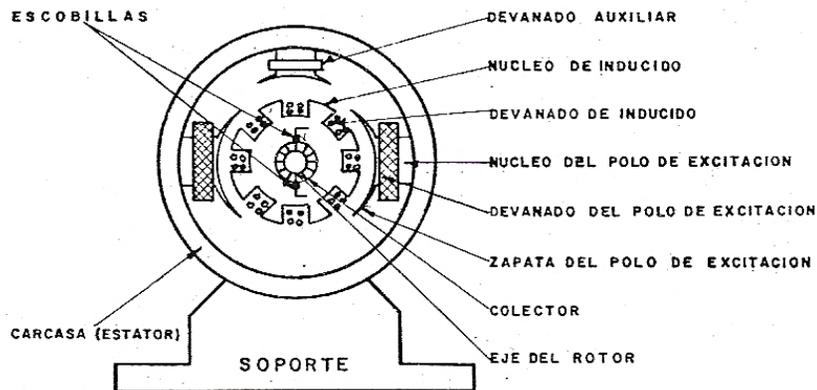


Figura. 5.1.5. Constitución de la máquina de c.c.

El inductor (estator) de la máquina consta de:

1.- un yugo o carcasa cilíndrica de acero fundido. Este yugo no sirve solo de soporte de las partes constitutivas, sino que también proporciona un camino de retorno para el flujo en el circuito magnético creado por:

2.- los devanados de excitación que constan de unas pocas espiras de hilo en el caso de la excitación serie o muchas espiras de alambre de pequeña sección en el caso de excitación paralela. Esencialmente, las bobinas de excitación son electroimanes cuyos ampers-vuelta proporcionan una fuerza magnetomotriz adecuada para producir en el entrehierro el flujo que se precisa para generar una f.e.m. los devanados de excitación se colocan en:

3.- los polos de excitación, contruidos de laminaciones de acero al silicio y unidos mediante pernos o soldados a la carcasa tras haber introducido en ellos el conjunto de devanados de excitación. Las zapatas de los polos son curvas más anchas que el núcleo del polo, con el fin de distribuir el flujo más uniformemente.

Máquinas eléctricas.

4.- Los polos auxiliares (interpolos) y sus devanados, también están montados sobre la carcasa de la máquina. Están situados en la región interpolar entre los polos principales y en general son de tamaño inferior. El devanado interpolar se compone de unas pocas espiras de alambre de gran sección, ya que están conectados en serie con el circuito del inducido. Su fuerza magnetomotriz (f.m.m.) es proporcional a la corriente del inducido.

5.- Los devanados de compensación, son opcionales; están conectados de la misma forma que los devanados interpolares, pero están colocados en ranuras axiales de la zapata del polo de excitación.

6.- Detalles mecánicos: unidos mecánicamente al yugo se encuentran los extremos de la carcasa que contienen los cojinetes sobre los que se apoya el eje del inducido, así como los portaescobillas en algunas máquinas.

5.2. Funcionamiento:

Básicamente un generador de c.c., conocido también como dinamo, produce electricidad por la rotación de un grupo de conductores que se mueven dentro de un campo magnético. Para lograr la rotación se debe tener una energía externa que mueva el rotor del generador para que exista movimiento de los conductores.

El generador de c.c., consiste fundamentalmente en un número de espiras formadas por conductores aislados, que giran en un fuerte campo magnético, de tal forma que esos conductores corten las líneas de fuerza (flujo magnético). Este corte de líneas de fuerza crea una fuerza electromotriz (f.e.m.) a lo largo de los conductores y a este hecho se le conoce como "inducción electromagnética".

SENTIDO DE LA FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA:

En la construcción de un generador se debe conocer la relación que existe entre la magnitud y el sentido de la f.e.m., inducida en un conductor que corta un flujo magnético. El sentido se puede determinar mediante la observación de la siguiente figura.

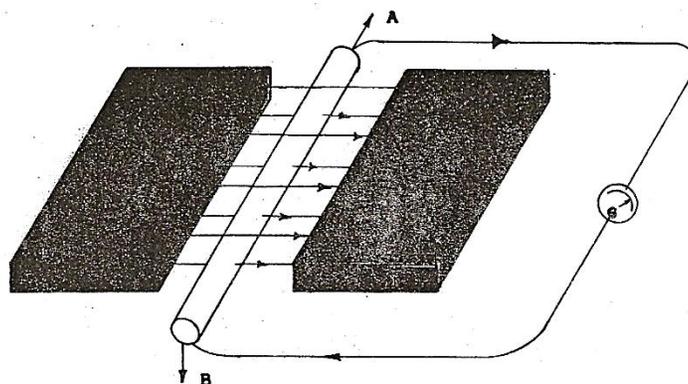


Figura. 5.2.1. Cuando un conductor corta el flujo magnético se induce una f.e.m.

Si el conductor AB se mueve hacia abajo a través del flujo, como se indica, se creara una tensión eléctrica en el conductor de A hacia B. si el conductor se mueve hacia arriba, la tensión se creara en el sentido opuesto, es decir de B hacia A, en ambos casos el galvanómetro indicara la magnitud como la dirección de la f.e.m., inducida.

En el caso que el sentido del campo magnético, la tensión también tendrá un sentido inverso para el mismo desplazamiento del conductor, de acuerdo con lo expuesto, el sentido de la tensión inducida depende del sentido del flujo y de la dirección del movimiento del conductor.

La regla para determinar el sentido de la fuerza electromotriz inducida es la siguiente:

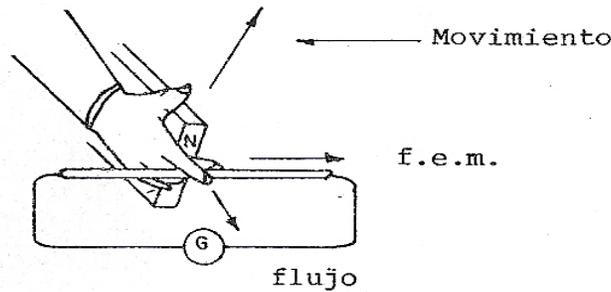


Figura. 5.2.2. Regla de la mano derecha o de Fleming.

Se extiende en ángulo recto entre si los dedos pulgar, índice y medio de la mano derecha, el pulgar indicara la dirección del movimiento, el índice la dirección del flujo magnético, y el medio indicara el sentido de la fuerza electromotriz inducida. (Regla de Fleming).

MAGNITUD DE LA FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA

La magnitud de la f.e.m. inducida depende del flujo cortado por segundo. Si un conductor corta un weber por segundo se induce una tensión de un volt entre los extremos.

En el caso de un generador (dinamo) de c.c., la fuente de flujo magnético se encuentra estática y el conductor en movimiento. En tanto en los generadores de C.A. (alternadores), el conductor es estático y la fuente de flujo magnético esta en movimiento. Como se puede observar en ambos casos se tiene un movimiento relativo entre el conductor y el flujo magnético, y así se tiene una generación de tensión.

La f.e.m., media inducida en el conductor durante un intervalo de tiempo se calcula utilizando la expresión siguiente.

$$E = -\frac{\phi}{t} \times 10^{-8} \text{ volts } (\phi : \text{maxwells}) \text{-----} (5.1)$$

$$E = -\frac{\phi}{t} \text{ volts } (\phi : \text{weber}) \text{-----} (5.2)$$

Máquinas eléctricas.

La densidad de flujo se determina como el producto de las dimensiones de las caras de las fuentes magnéticas (área) y de la inducción magnética de estas, esto es:

$$\phi = B \cdot A \text{ weber} \text{-----} (5.3)$$

Dónde:

B: Densidad de flujo magnético en Gauss.

ϕ : Flujo magnético en Maxwell.

A: Área de las caras polares.

t: Tiempo en segundos.

Ejemplo 1:

Un conductor pasa 40 veces por segundo frente a un polo de un campo magnético donde la inducción es de 0.232 weber/m². Las dimensiones de la cara del polo magnético son 50X76 cm.

¿Qué f.e.m. se induce en el conductor?

Datos:

$t = 40 \text{ veces por segundo.}$

$B = 0.232 \text{ weber/m}^2$

$A = 50 \times 76 \text{ cm}$

Solución:

$$\phi = B \cdot A = \left(0.232 \frac{\text{weber}}{\text{m}^2}\right) (0.76 \times 0.5)$$

$\phi = 0.088 \text{ weber.}$

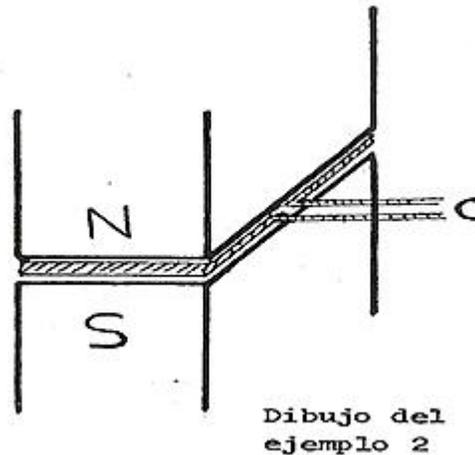
El flujo total cortado es = 0.088 weber X 40

El flujo total cortado es = 3.52 weber

La tensión generada es:

$$E = \frac{\phi}{t} \text{ volts} = \frac{3.52}{1} = 3.52 \text{ volts}$$

Máquinas eléctricas.



Ejemplo 2:

En la figura se muestra, se representa los dos polos de un electroimán con un entrehierro uniforme. Los polos son de sección rectangular de 20 X 25 cm. En el entrehierro se sitúa, como se observa una bobina de C de 80 espiras, también de 20 X 25 cm., de modo que todo el flujo del entrehierro pasa por ella. La densidad de este flujo es de 4,800 Gauss. Se hace salir la bobina del entrehierro en 0.001 seg. Determinar la f.e.m., inducida en la bobina calculando a partir de:

- a).- La variación de flujo
- b).- si la bobina se mueve paralelamente al lado de 20 cm.

Ejemplo 3:

Una bobina de 25 cm² y 80 espiras, tiene su plano perpendicular a un campo magnético uniforme cuya densidad es de 9000 Gauss. Se le hace dar un cuarto de vuelta alrededor de su eje en 0.05 seg., de manera que su plano se coloque en posición paralela al campo. Determinar:

- a).- El flujo máximo que corta la bobina.
- b).- La f.e.m., inducida durante el periodo en que da el cuarto de vuelta.
- c).- La f.e.m., inducida si la bobina gira a 100 r.p.s.
- d).- La f.e.m., en el instante en que el plano de la bobina es perpendicular a la dirección del campo magnético.

La f.e.m., inducida también se puede conocer aplicando los factores que afectan a esta, o sea, la densidad de flujo (B), longitud del conductor y la velocidad con que este corta a las líneas de fuerza.

$$E = B \ell v \times 10^{-8} \text{ volts} \text{-----} (5.4)$$

Dónde:

B; Esta dado en Gauss

ℓ ; En centímetros

v ; En centímetros/seg.

Si la densidad de flujo se expresa en weber por metro cuadrado, ℓ en metros, y v en metros/seg. La expresión anterior se transforma a la siguiente:

$$E = B \ell v \text{ volts} \text{-----} (5.5)$$

Ejemplo:

Calcular la f.e.m. inducida en un conductor que corta con una velocidad uniforme, en un tiempo de 5 seg, el campo magnético es generado por un par de polos, cuyas caras polares son de 40 X 20 cm, y la densidad de campo es de 3000 Gauss.

Datos:

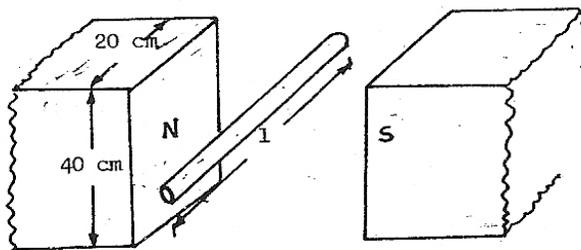
$$t = 5 \text{ seg.}$$

$$A = 40 \times 20 \text{ cm.}$$

$$B = 3000 \text{ gauss.}$$

Solución:

Aplicando la expresión (5.1) se tiene:



$$E = \frac{\Phi}{t} \times 10^{-8}$$

$$\Phi = B \cdot A = (3000)(40 \times 20) = 24 \times 10^5 \text{ maxwells.}$$

$$E = \frac{24 \times 10^5}{5} \times 10^{-8} = 4.8 \times 10^{-3} = 0.0048 \text{ volts.}$$

Máquinas eléctricas.

Ahora este resultado se puede comprobar con la expresión (5.5)

$$E = B \ell v \times 10^{-8}$$

$$\text{Dónde: } v = \frac{40}{5} \therefore v = 8 \frac{\text{cm}}{\text{seg.}}$$

$$E = (3000)(20)(8) \times 10^{-8} = 48 \times 10^{-4} = 0.0048 \text{ volts.}$$

GENERADOR ELEMENTAL:

En un generador en lugar de tener un conductor recto, se cuenta con una espira que gira en tal forma que corte las líneas de fuerza del campo magnético producido ya sea por imanes permanentes o por electroimán.

La expresión para conocer la f.e.m. en un generador es la utilizada en el conductor recto, nada más que en este caso se debe incluir el número de espira, esto es:

$$E = N \frac{\phi}{t} \text{ volts} \text{-----} (5.6)$$

Dónde:

N= número de espiras.

El generador elemental consta básicamente de los siguientes partes:

- 1).- Un campo magnético.
- 2).- Un conductor o espira.
- 3).- Conmutador.
- 4).- Escobillas.

El conmutador es el medio de comunicar el voltaje generado y así alimentar a un circuito externo, a través de las escobillas. En los generadores de c.c. el conmutador está formado por un anillo seccionado, en tanto que en el generador de C.A, este consta de dos anillos no seccionados.

La figura (5.2.3) representa un conductor en forma de espira que gira según la dirección indicada por la flecha.

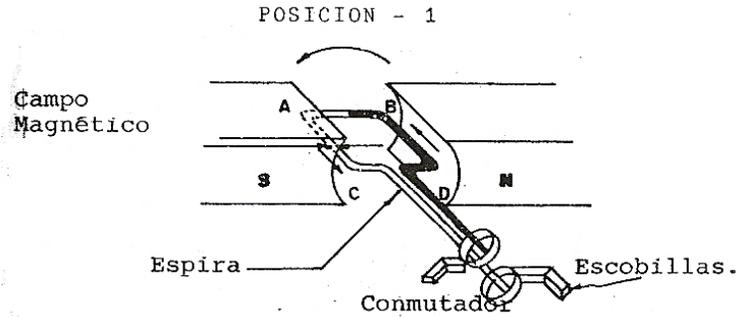


Figura. 5.2.3. Dirección de la f.e.m. inducida en una espira.

El lado de la espira BD se mueve hacia arriba a través del flujo. Aplicando la regla de la mano derecha, se determina que el sentido de la f.e.m. es de D a B. el lado AC se mueve hacia abajo y la f.e.m. inducida va de A a C. por lo tanto, en la espira circulara una corriente en el sentido ACDB, como se indica. En esta posición en la espira se induce una f.e.m. máxima, en virtud de que los lados activos de la espira se encuentran perpendicularmente a las líneas de fuerza.

En la posición (2) en que la espira A ha avanzado 90° con respecto a la posición anterior, los costados se encuentran paralelos a las líneas de fuerza y en esta situación no estarán cortando líneas de fuerza y a la f.e.m. inducida es cero. Esto se comprueba empleando la expresión (5.5).

$$E = B \ell v \text{ sen}\phi \text{ siendo } \phi = 0 \Rightarrow \text{sen}0^\circ = 0$$

$$E = B \ell v \text{ sen} = 0^\circ$$

$$E = 0$$

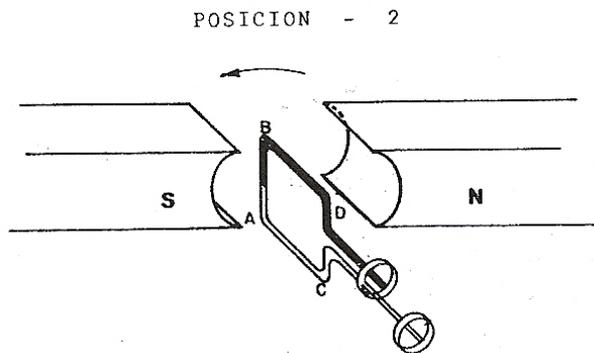


Figura. 5.2.4. Cuando la espira se encuentra en esta posición no se induce tensión.

A medida que la espira se sigue desplazando los conductores cortaran al flujo, la dirección de la f.e.m. invertirá el sentido, o sea, el conductor BD ha girado 180° con respecto a su posición inicial, ahora se desplaza hacia abajo y debido a esto la dirección de la f.e.m. será del B a D. por la misma razón, se invierte el sentido de la f.e.m. en el

costado AC y estará de C a A. originándose una corriente en la espira que circula en la dirección BDCA:

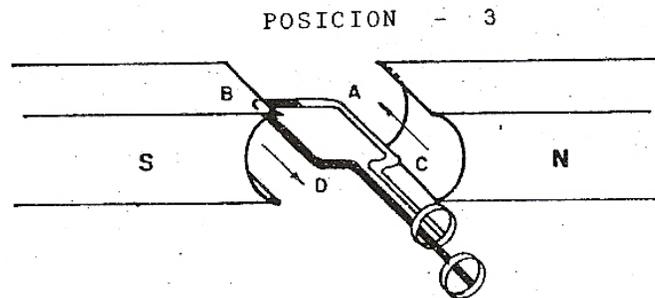


Figura. 5.2.5. La espira ha girado 180° existiendo una inversión en la dirección de la f.e.m.

La espira tendrá un valor máximo en el sentido opuesto a cuando se encontraba en la posición 1, ya que se han invertido las direcciones de las f.e.m. en los costados.

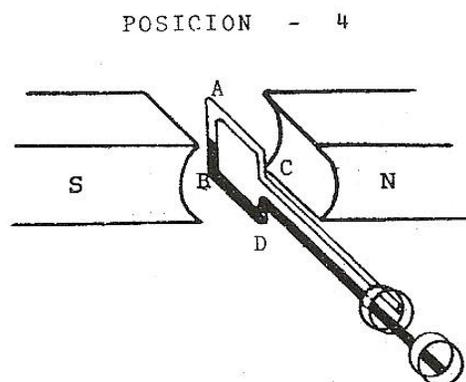


Figura. 5.2.6. La espira se encuentra perpendicular al campo no se tendrá f.e.m. inducida.

La espira gira 270° en donde los costados están paralelos a las líneas de fuerza no cortándolas y se dice que la espira está en la posición cero.

CURVA REPRESENTATIVA DE LA FUERZA ELECTROMOTRIZ:

En la figura (5.2.6), la bobina está en la posición cero. La posición de la espira de la figura (5.2.3) está a 90° de la posición cero. Cuando la espira este colocada nuevamente en posición vertical, de nuevo estará en la posición cero, a 180° de la primera posición cero (fig.5.2.4). Cuando este nuevamente en la posición horizontal (fig.5.2.5) estará a 270° de la primera posición cero.

Los valores de las f.e.ms., como la forma de onda que resulta del movimiento de la espira se representan en la figura (5.2.7).

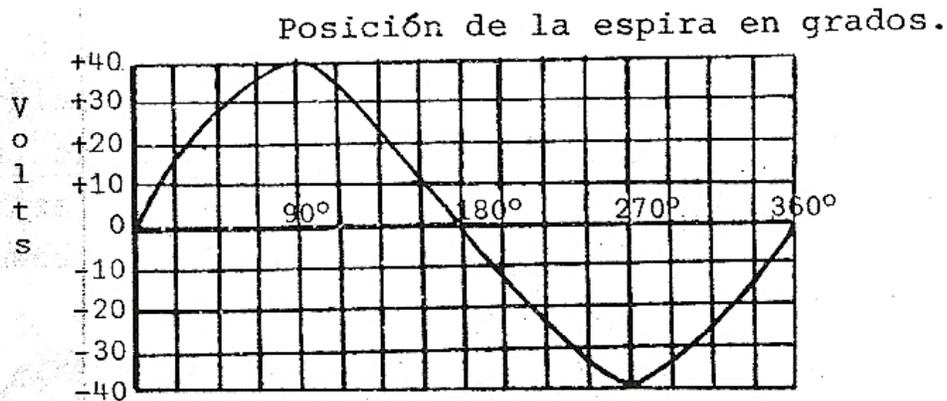


Figura. 5.2.7. Curva senoidal de f.e.m. inducida.

Para obtener una tensión máxima en un generador se debe tener:

Primero: se usan bobinas con núcleos de hierro para aumentar y concentrar el flujo magnético.

Segundo: se arrolla un mayor número de espiras en serie sobre el núcleo, de tal forma que la tensión en bornes en cualquier instante sea la suma de la tensión en cada una de las espiras.

Las espiras que forman a los conductores y el núcleo, además del dispositivo para tomar la corriente de las espiras, forman el "inducido" del generador de c.c.

Un generador puede suministrar corriente continua o alterna dependiendo del dispositivo empleado para tomar la corriente inducida. Estos dispositivos pueden ser: "anillos rozantes" los cuales suministran corriente alterna, o bien un "colector, que suministrara corriente continua.

Cuando la espira gira la escobilla está sobre una delga del conmutador se desliza a lo largo de este y la espira. De esta manera, cada escobilla hace contacto con la terminal de la espira conectada a la mitad del conmutador sobre el cual está la escobilla. Al girar el conmutador estando las escobillas estacionadas, cada una de estas primero hace contacto con una delga y luego con la otra, lo cual significa que cada escobilla hace primero contacto con un extremo de la espira y luego con el otro. Por lo tanto una escobilla siempre es positiva respecto a la otra, con lo que la magnitud del voltaje que hay entre escobillas fluctúa entre cero y algún valor máximo pero siempre tiene la misma polaridad.

Obteniéndose a la salida del generador un voltaje de c.c. fluctuante.

La figura (5.2.8), muestra la secuencia del tipo de señal que se tiene en un generador de c.c.

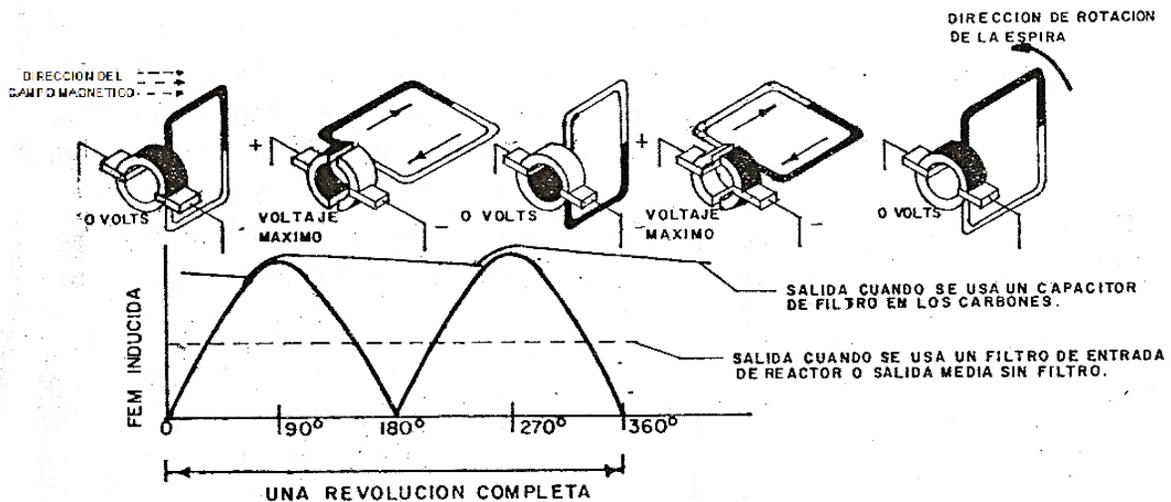


Figura 5.2.8. Salida de señal de un generador de c.c. en una espira.

Cuando se invierte la dirección de la corriente en la espira, las conexiones en el circuito externo se invierten también. Por lo tanto, la dirección de circulación de la corriente en el circuito exterior es invariable. Las escobillas pasan sobre los segmentos del colector, cuando la espira es perpendicular al campo magnético, esto es, en el “plano neutro”, cuando no se produce ninguna f.e.m., como sucedía en las posiciones 0° , 180° y 360° , de la fig. (5.2.7).

Comparando las figuras (5.2.7) y (5.2.8) se observa que la mitad negativa de la señal se ha invertido convirtiéndose en positiva.

Una máquina con una sola espira tiene muy poco rendimiento para su tamaño y peso. Se puede lograr que la f.e.m., ondulatoria de la figura (5.2.8), tenga menos oscilaciones si se emplean dos espiras y cuatro delgas en el colector.

Las dos espiras deberían estar a 90° una con respecto a la otra, así pues, cuando el voltaje de una espira disminuye, el de la otra aumenta, y viceversa. Al descender el voltaje en una espira por debajo de la otra, las escobillas pasan de los segmentos de la espira que tiene voltaje creciente. En la figura (5.2.9), se muestra un inducido con dos espiras y la f.e.m. inducida, aun todavía pulsante, de lo cual se deduce que al aumentar el número de espiras se tendrá una corriente directa sin pulsaciones.

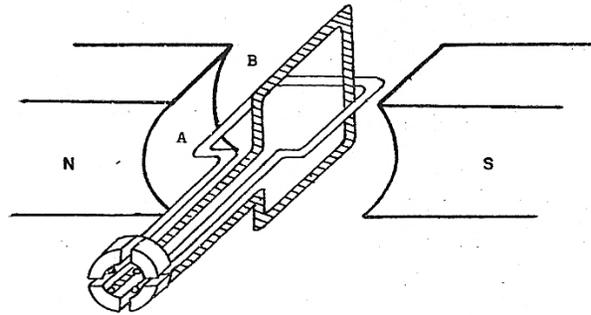


Figura 5.2.9. (a) Dos espiras de un inducido de generador de c.c., con colector de cuatro delgas.

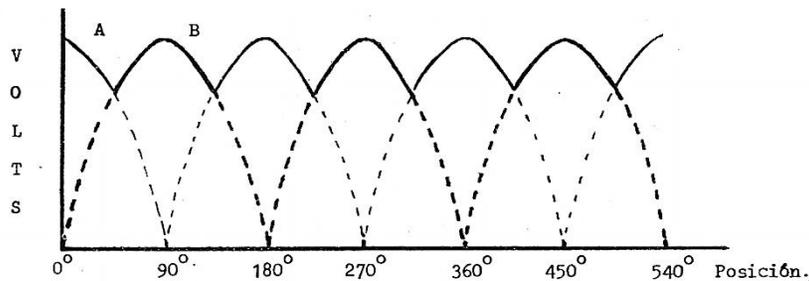


Figura 5.2.9. (b) La línea llena es la forma de un inducido de dos espiras.

5.3. Circuito equivalente:

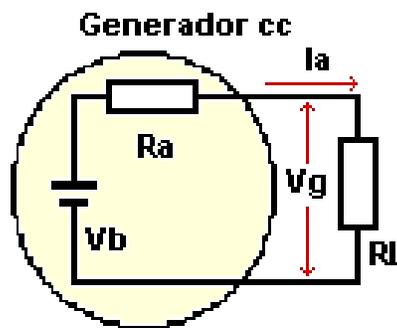


Figura 5.3.1.

En el gráfico se muestra el circuito equivalente de un generador de corriente continua. La tensión de salida se obtiene con ayuda de la ley de tensiones de Kirchhoff. $V_g = V_b - (I_a \times R_a)$.

Dónde:

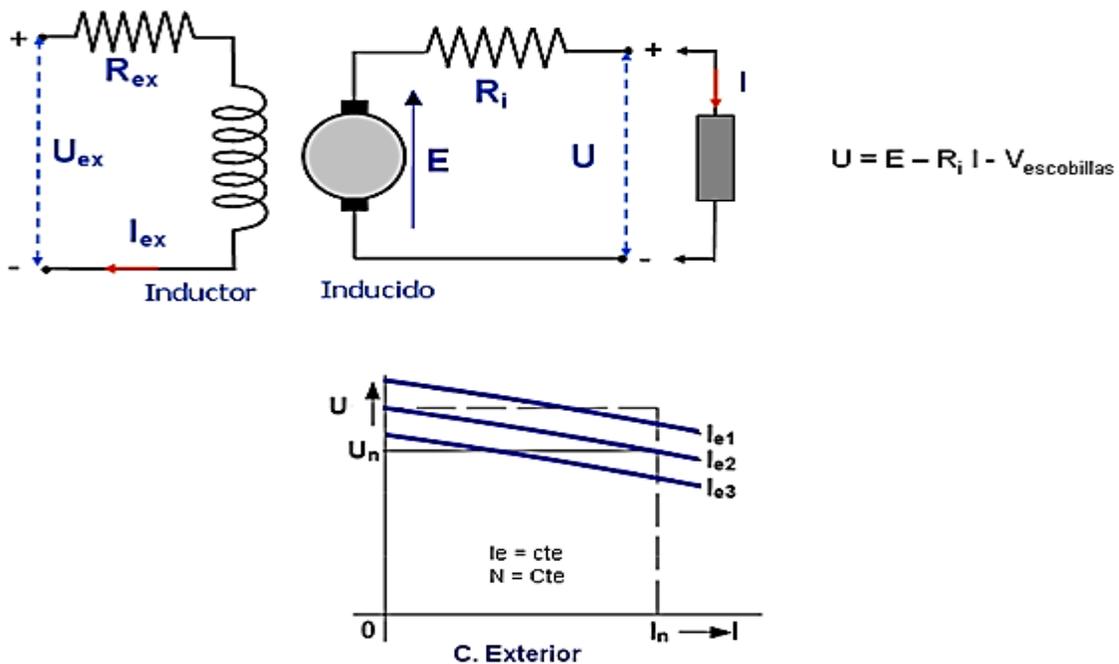
- V_b = Fuerza contraelectromotriz del motor (FCEM).
- I_a = Corriente de excitación.
- R_a = Resistencia del devanado.

Se puede ver que la tensión de salida es igual a la FCEM del motor menos la caída de tensión en el devanado del mismo.

Máquinas eléctricas.

5.4. Generador con excitación independiente:

La excitación independiente significa que la corriente continua que alimenta el devanado inductor procede de una fuente independiente de la máquina, como una batería de acumuladores, un rectificador conectado a una red alterna, o bien un generador de corriente continua rotativo. En este último caso, si el generador va montado sobre el propio eje de la máquina, la excitación independiente se denomina excitación propia.



Figuras 5.4.1.

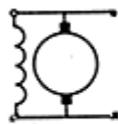
5.5. Generador auto excitable:

La autoexcitación significa que la corriente continua que excita las bobinas inductoras procede de la misma máquina generatriz. Para obtener la autoexcitación o cebado de la máquina, es preciso que exista un pequeño flujo en el circuito magnético, flujo que es posible producir y mantener gracias al fenómeno de histéresis magnética. Gracias a este flujo remanente, al hacer girar el inducido se inducirá en él una pequeña f.e.m. que aplicada al circuito inductor, con la polaridad conveniente, genera una débil corriente que refuerza el magnetismo remanente y la f.e.m. inicial debida al flujo remanente se incrementará. A mayor f.e.m., corresponderá mayor corriente, con el refuerzo consiguiente del flujo, luego se produce un nuevo aumento de la f.e.m. y así sucesivamente hasta alcanzar un equilibrio o estabilidad de la tensión en bornes que se traducirá en una constancia de la corriente de excitación y por tanto del flujo. A esta

estabilidad se llega por causa de otra propiedad característica de los materiales magnéticos, la de saturación.

Dependiendo de la conexión entre el devanado inductor y el inducido se distinguen tres tipos de máquinas autoexcitadas: la máquina serie, la máquina derivación y la máquina compuesta o compound.

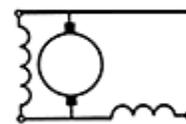
Sistemas de Excitación



Paralelo

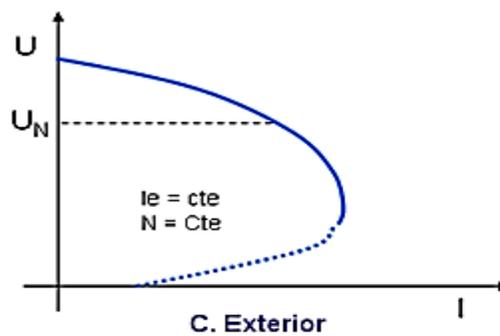
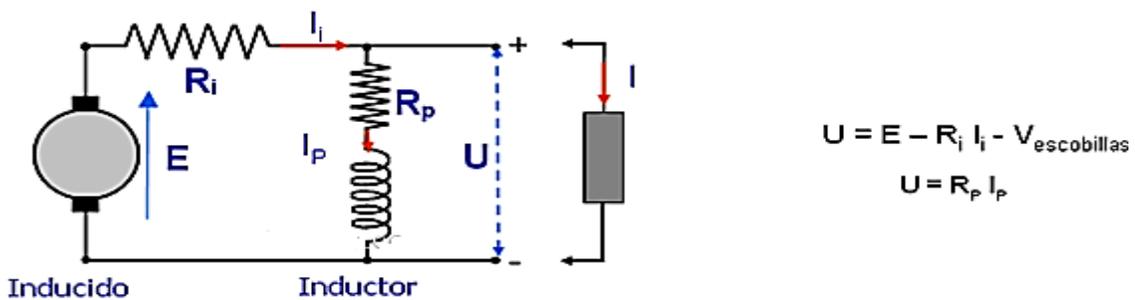


Serie



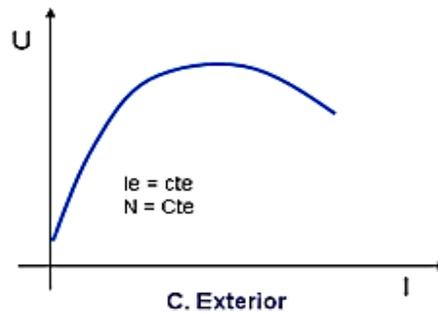
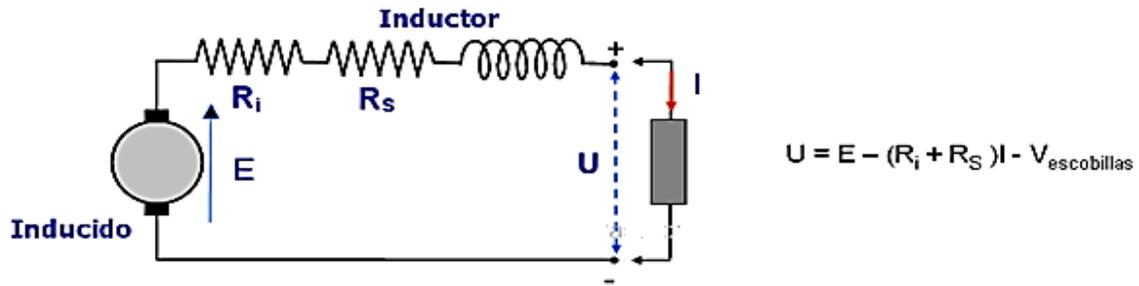
Compuesta

5.5.1. Paralelo:



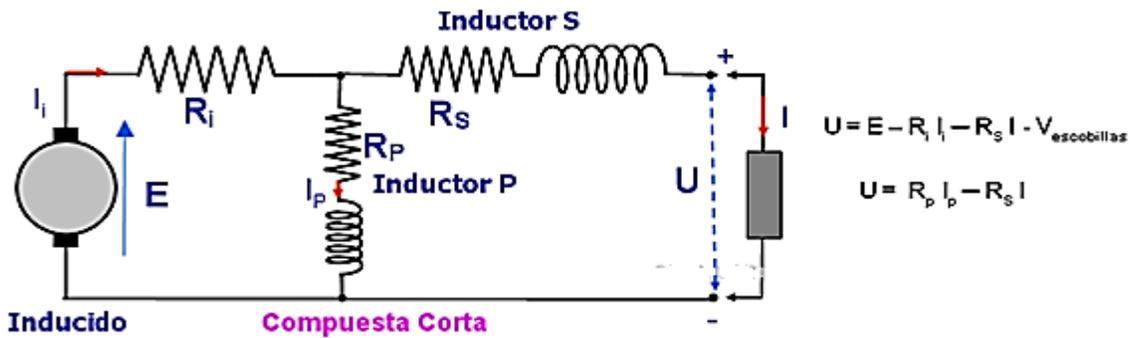
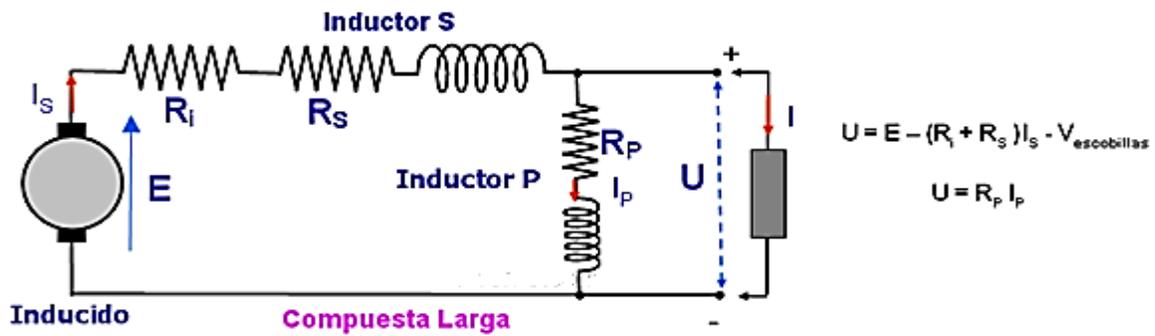
Figuras 5.5.1.1.

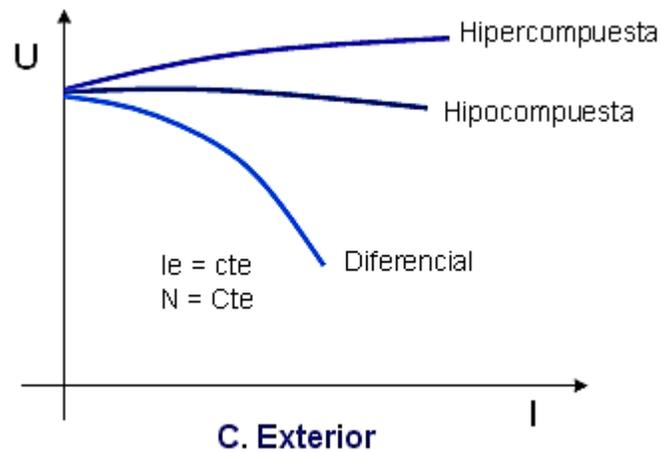
5.5.2. Serie:



Figuras 5.5.2.1.

5.5.3. Compuesto:





Figuras 5.5.3.1.

5.6. Material didáctico*:

1. <http://www.tuveras.com/maquinascc/conceptosprevios.htm>
2. <http://www.tuveras.com/maquinascc/estructura.htm>
3. <http://www.tuveras.com/maquinascc/dinamo/dinamo.htm>
4. <http://www.tuveras.com/maquinascc/dinamo/reaccion.htm>
5. <http://www.tuveras.com/maquinascc/dinamo/excitaciondinamo.htm>
6. http://www.walter-fendt.de/ph14s/generator_s.htm
7. <http://www.youtube.com/watch?v=Vg06IUci05w>

6. Generadores de corriente alterna:

6.1. Estructura:

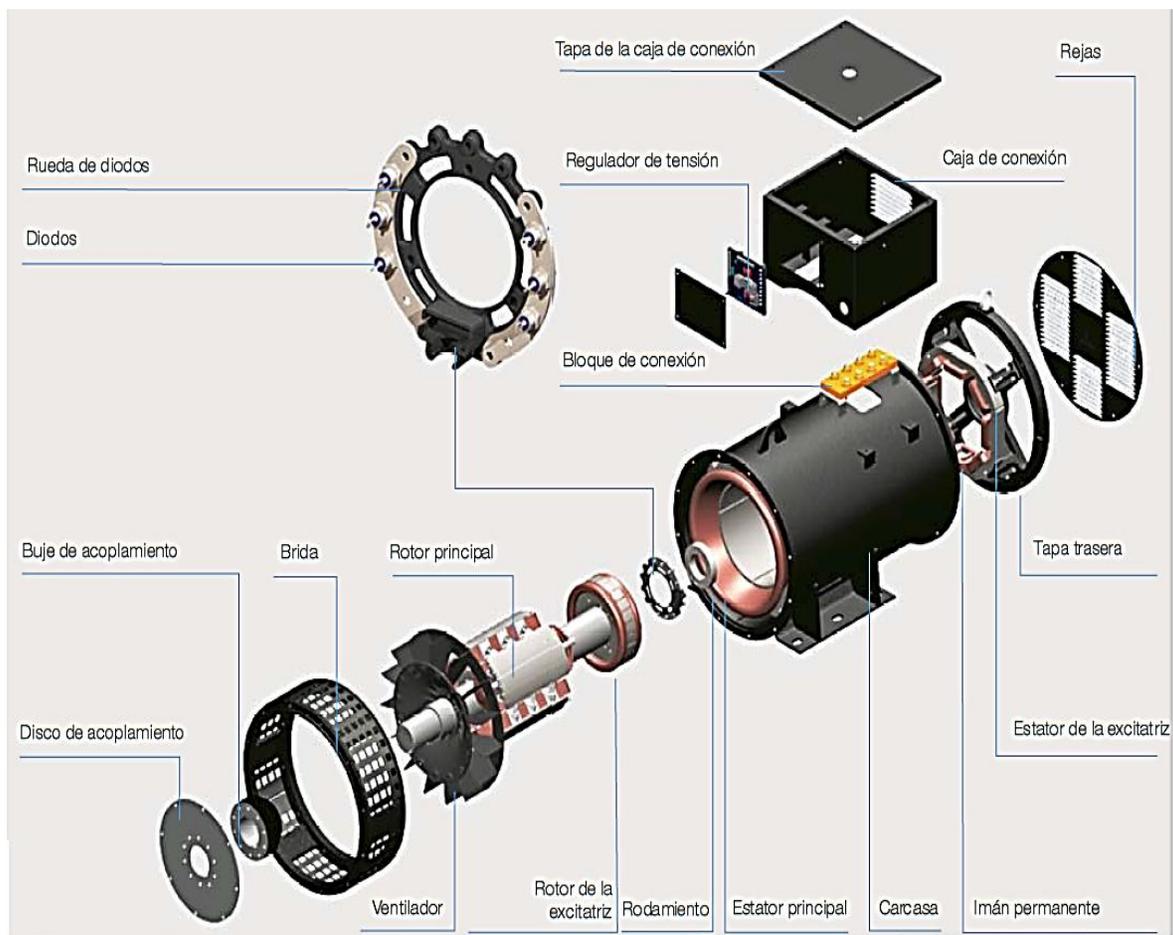


Figura. 6.1.1. Partes de un generador de C.A.

Un generador síncrono se podría construir reemplazando el conmutador en una máquina de C.D. por anillos rozantes, el voltaje de C.A. generado internamente aparecería a través de las escobillas estacionarias que se deslizan sobre los anillos rozantes. Para los voltajes trifásicos generados, se requieren tres anillos rozantes que se deben conectar a los puntos apropiados del devanado de armadura. Esta construcción prácticamente no se usa y se prefiere al alternador de campo estacionario.

A diferencia de los generadores de C.D., los generadores síncronos se deben accionar a una velocidad constante, la razón es que la frecuencia del voltaje generado, que es la de la red eléctrica que alimenta, está directamente relacionada con la velocidad, por lo tanto, la velocidad mecánica del generador se debe sincronizar con la frecuencia eléctrica, de aquí el nombre de máquina síncrona.

El principio involucrado es simplemente este: La acción del generador depende totalmente del movimiento relativo del conductor con respecto a las líneas de campo, esto sugiere

Máquinas eléctricas.

que es posible construir un generador de C.A. en el cual el papel de los miembros estacionario y rotatorio este intercambiando, como se ha comparado antes con la máquina de C.D., esto es lo que se ha hecho en los generadores prácticos, el devanado en el cual los voltajes son inducidos, es decir, el devanado de armadura, están colocados en el estator, el circuito del campo está sobre el rotor.

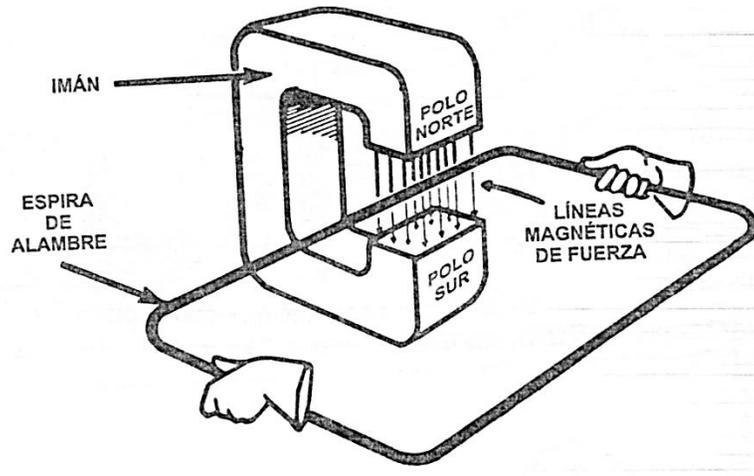
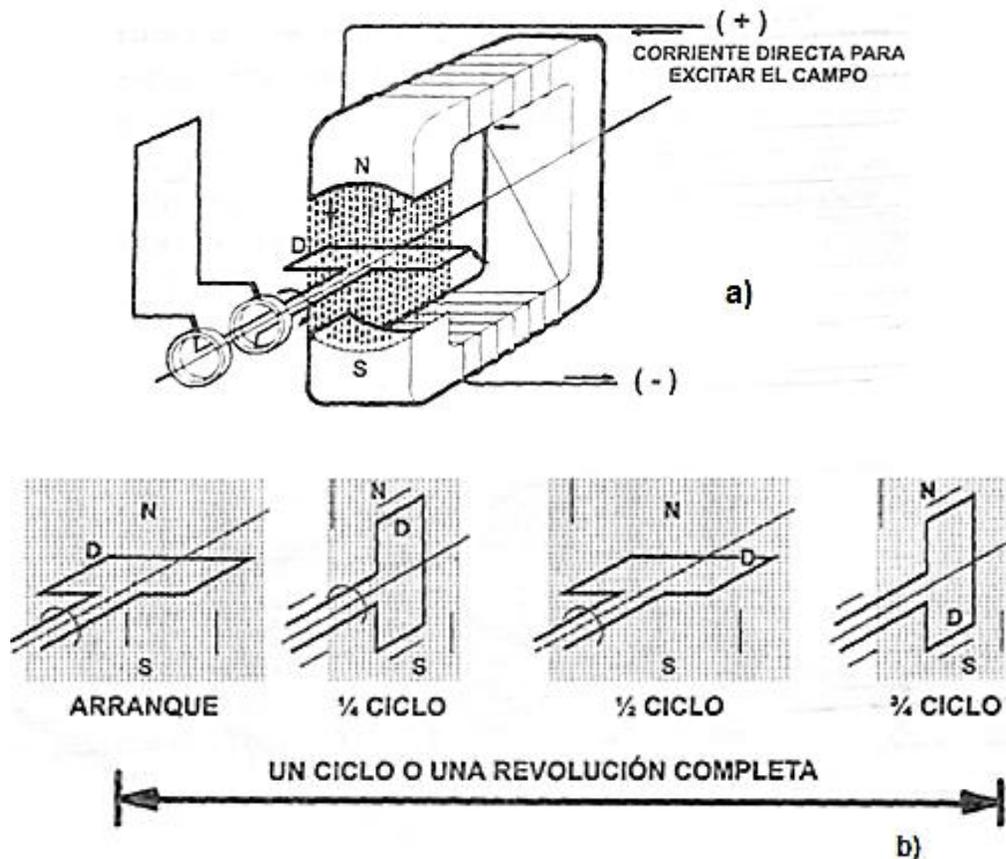
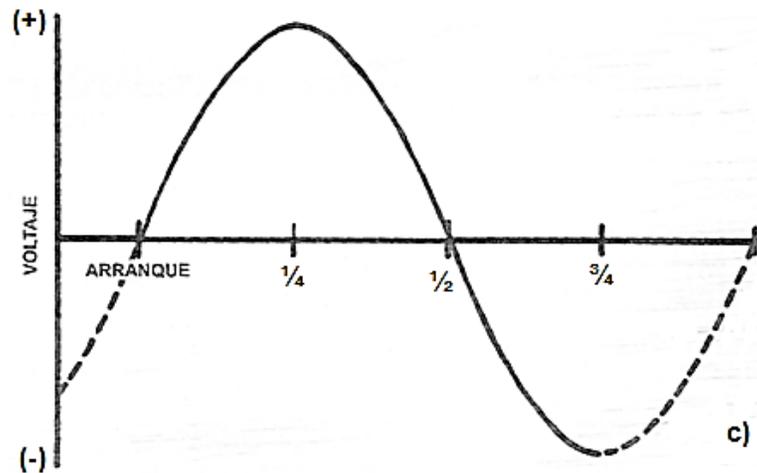


Figura. 6.1.2. Generación de electricidad por medio del magnetismo y la acción mecánica.





Figuras. 6.1.3. a), b), y c). Generación de corriente alterna.

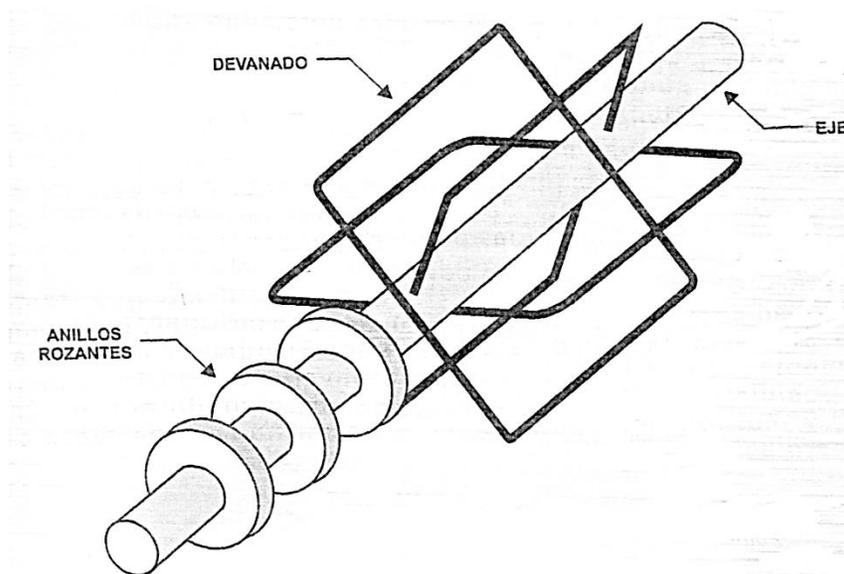


Figura. 6.1.4. Diseño básico de una armadura trifásica.

En el generador de tipo práctico, como ya se ha mencionado antes, es preferible el arreglo de campo giratorio (bobina en el rotor) y armadura estacionaria (estator) por varias razones, como son:

1. El devanado de armadura generalmente está dimensionado para altos voltajes y corrientes, es mucho más grande y complejo que el devanado de campo, por lo tanto, es mejor y más seguro que este en la parte estacionaria, tanto en la parte eléctrica como la mecánica.
2. El devanado de armadura es más fácil de enfriar cuando es estacionario que cuando es rotatorio o giratorio. Debido a que el núcleo del estator es más grande, otorga una mejor circulación del aire forzado, ya que permite disponer de un número mayor de ductos de aire.

3. Las bobinas del campo llevan relativamente poca corriente comparativamente con las bobinas de armadura y, por lo tanto, las conexiones eléctricas rotativas son menores, no se requiere inversión de polaridad y se emplean anillos rozantes.
4. No se requiere acción del conmutador, haciendo que las conexiones de la armadura de alta potencia sean más fáciles de hacer sobre algún miembro estacionario.

El estator:

Como es típico en todas las maquinas eléctricas, el estator de un generador síncrono consiste de acero de buena calidad eléctrica, en forma laminada para minimizar las pérdidas por corrientes circulantes.

El concepto de buen acero eléctrico quiere decir que tanto la permeabilidad como la resistividad del material sean altas, generalmente el acero al silicio satisface este requisito. El número de ranuras es generalmente tal que se puede usar un devanado trifásico simétrico, esto es posible cuando el número de ranuras dividido por el número de polos y multiplicando este cociente por el número de fases es un entero, esto es:

$$\frac{\text{Ranuras} \times \text{Fases}}{\text{Polos}} = \text{Entero}$$

En las máquinas de baja velocidad y gran diámetro, tales como los generadores de usados en las centrales hidroeléctricas, que tienen un elevado número de polos, la longitud del estator es relativamente corta, en cambio en las máquinas de alta velocidad, como aquellas accionadas por turbinas de vapor, se usan solo 2 o 4 polos y la longitud axial es varias veces el diámetro.

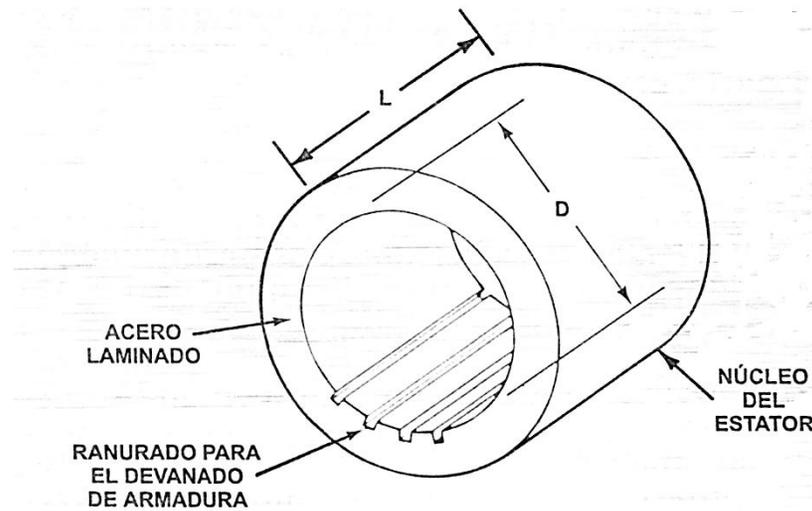


Figura. 6.1.5. Ranurado y laminado del núcleo del estator.

En la medida que la máquina sea más grande, se requiere de más cobre en la armadura y para acomodar conductores de gran tamaño se requieren ranuras de mayor profundidad, entonces el estator debe ser más ancho y fuerte en la base, esto se muestra en la

Máquinas eléctricas.

siguiente figura. Alrededor del 55% de la circunferencia del estator se debe dejar para los dientes, para permitir transportar el flujo magnético necesario en forma segura y sin exceder la máxima densidad de flujo, esto deja aproximadamente el 45% de la circunferencia para ranuras que se deben llenar con los conductores y el aislamiento.

Más bobinas, significa un número mayor de ranuras y, por otro lado, menos ranuras, pero más anchas significa menos espiras de conductores más robustos.

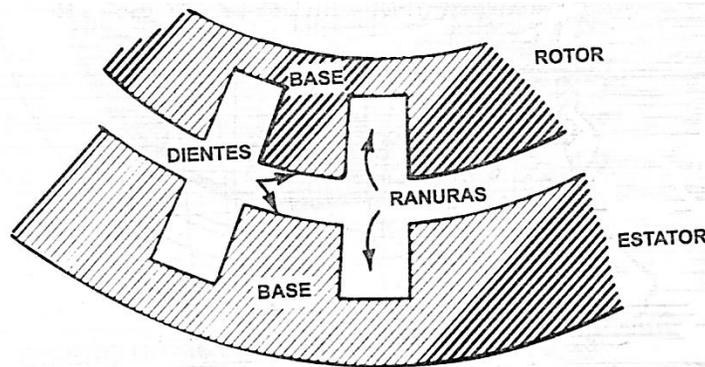


Figura. 6.1.6. Para igual profundidad de ranura de los dientes en el estator este es más ancho y fuerte en la base.

En el primer caso se tienen características de alto voltaje y baja corriente, en tanto que en el segundo se puede tener alta corriente con bajo voltaje.

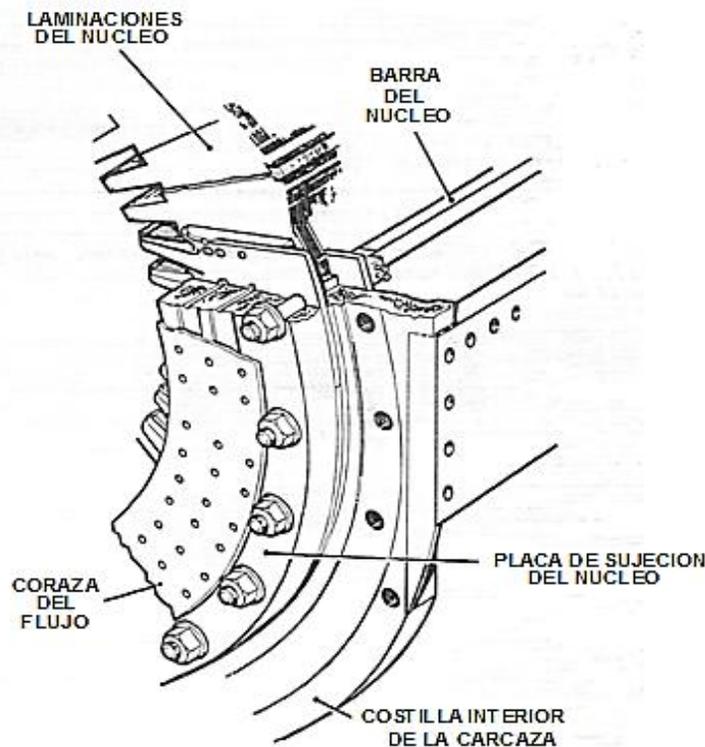


Figura. 6.1.7. Sección de un estator.

La capacidad de una máquina se puede dar normalmente en KVA (kilovolt-ampere), cuando se excede esta capacidad, la máquina opera a alta temperatura y el aislamiento tiende a deteriorarse más rápido. La capacidad determina el tamaño global, el cual se relaciona con las dimensiones de la máquina, el tipo de diseño, el sistema de enfriamiento, etc.

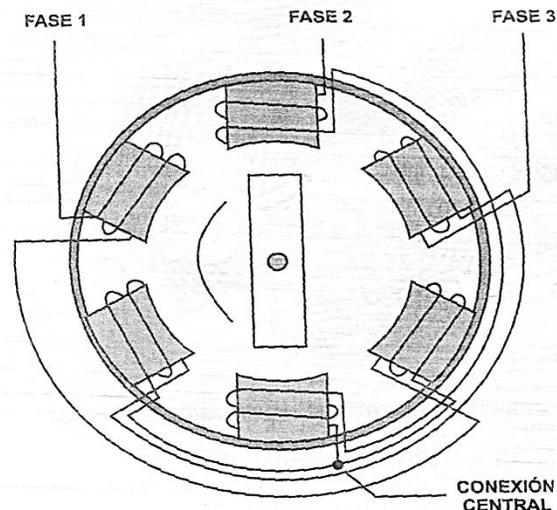


Figura. 6.1.8. Diseño básico de un alternador trifásico.

El rotor:

La parte rotatoria de un generador síncrono está normalmente construida en una o dos formas: (1) con polos salientes (2) con rotor cilíndrico. La máquina con rotor de polos salientes tiene alimentación de C.D. en el devanado de campo del rotor, para producir el campo magnético; a la zapata polar se le da una forma que permita que la densidad de flujo en el entrehierro tenga una forma senoidal.

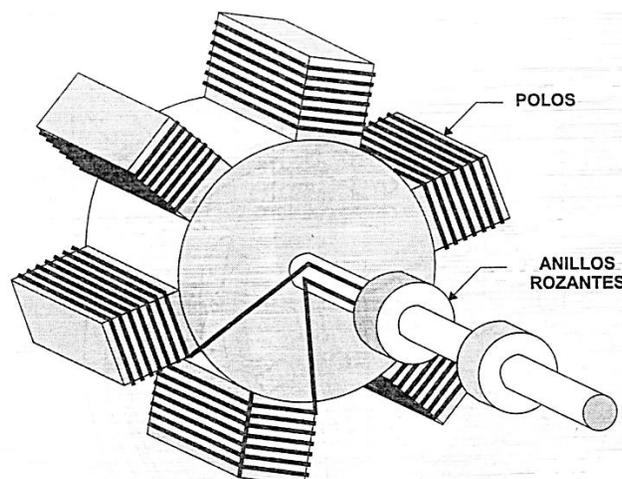


Figura. 6.1.9. Aspecto del rotor mostrando los polos.

Máquinas eléctricas.

En los generadores de rotor cilíndrico, el devanado de C.D. está colocado en las ranuras del rotor, como en el entrehierro es uniforme se obtiene una mejor distribución del flujo, comparativamente con las máquinas de rotor con polos salientes.

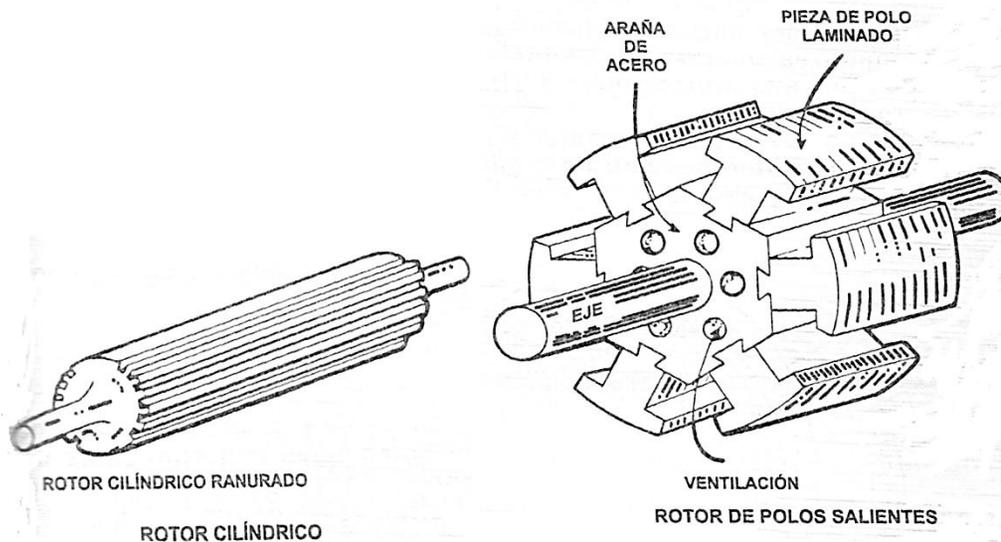


Figura. 6.1.10. Tipos de rotor.

Las máquinas de rotor con polos salientes se usan en las centrales hidroeléctricas en donde operan a muy baja velocidad y entonces requieren de un elevado número de polos. Esta relación se puede observar de acuerdo a la siguiente expresión:

$$f = \frac{P}{2} = \frac{N}{60}$$

P = Número de polos.

N = Velocidad en RPM.

También:

$$f = \frac{P_N}{120}$$

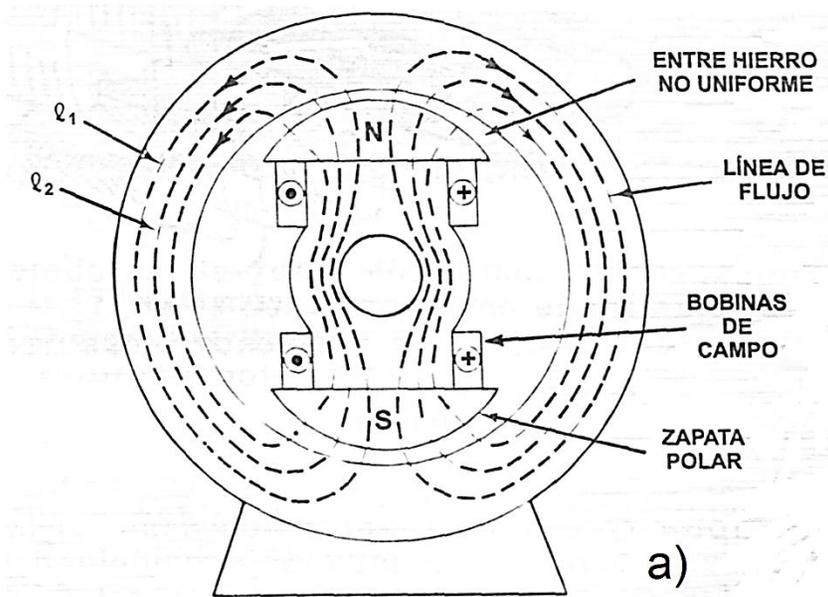
Por ejemplo, una máquina con 48 polos y generación a 60 Hz, opera a:

$$N = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 60}{48} = 150 \text{ RPM}$$

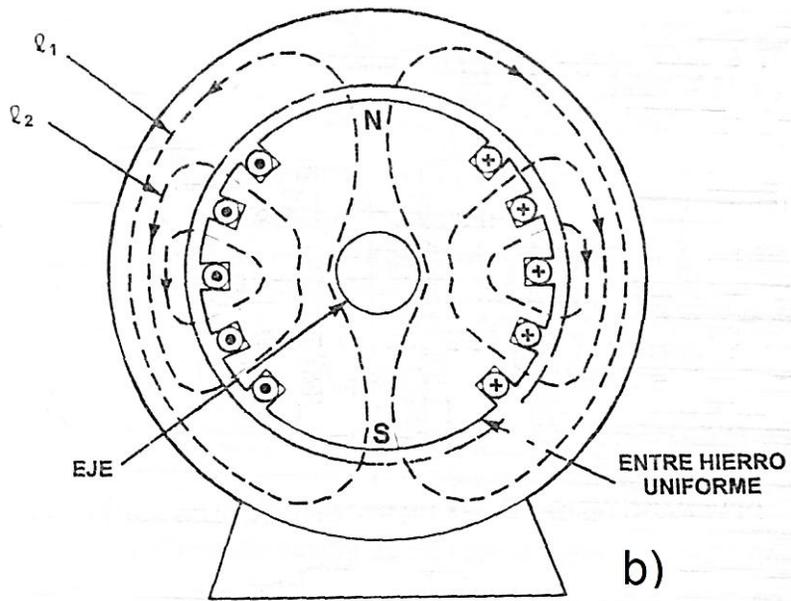
Los rotores de tipo cilíndrico se usan en forma exclusiva en generadores accionados por turbinas de vapor y como tales son conocidos como turbo alternadores o turbogeneradores, tienen por lo general dos o cuatro polos por sus aplicaciones a altas velocidades y debido a que estos rotores son compactos, pueden soportar las fuerzas

Máquinas eléctricas.

centrífugas desarrolladas en los grandes generadores a altas velocidades. Algunas veces los rotores cilíndricos son no laminados y su ranurado se trabaja por fuera.



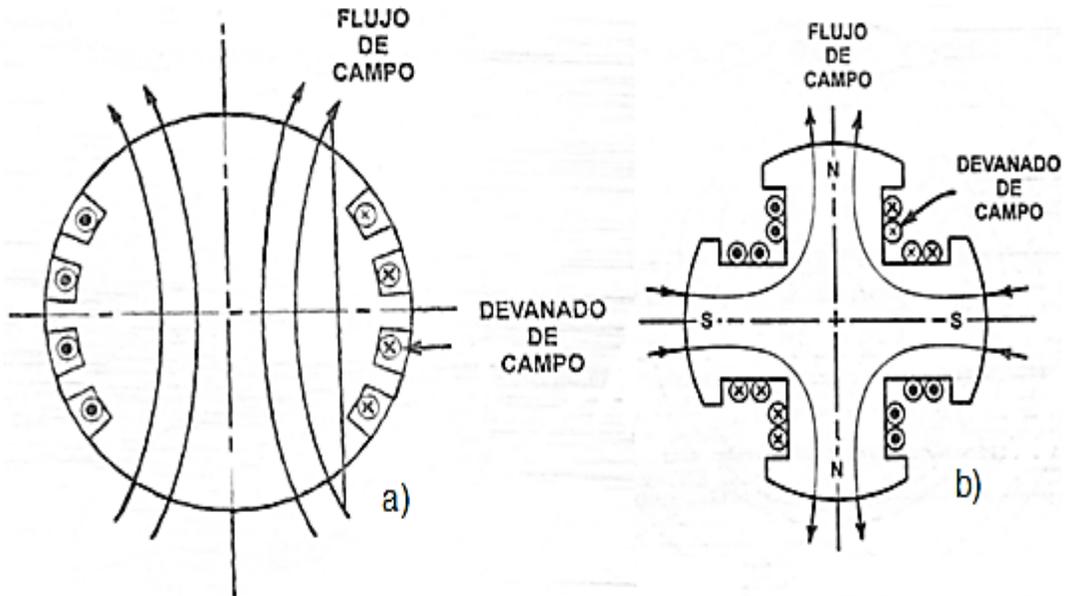
Generador de polos salientes.



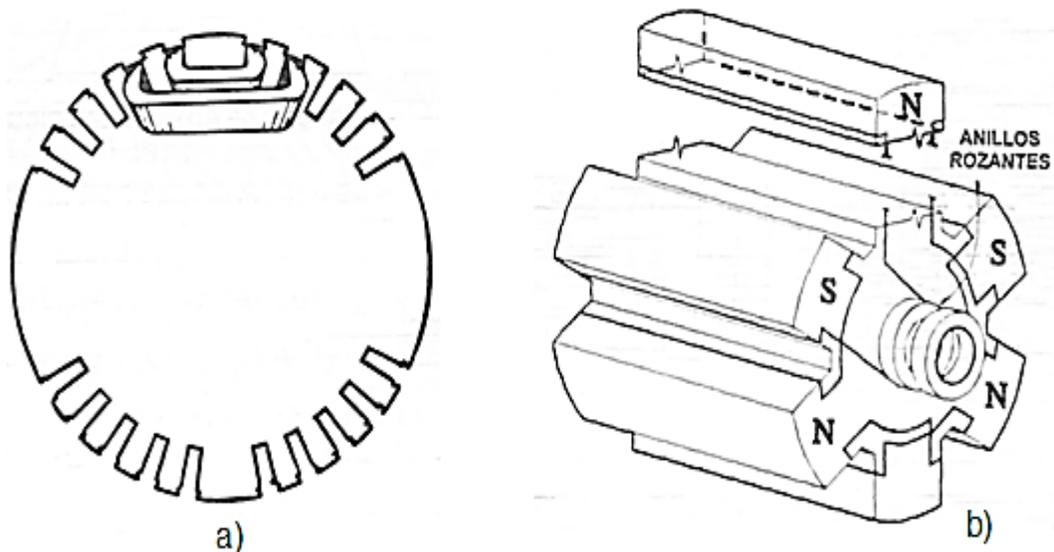
Generador de rotor cilíndrico.

Figuras. 6.1.11. a) y b). Clasificación de los generadores por el tipo de rotor.

La velocidad del rotor y su frecuencia están relacionadas por medio de la expresión: $f = \frac{PN}{120}$, la figura anterior representa un generador elemental monofásico de 2 polos, de polos salientes y de rotor cilíndrico, indicando las trayectorias para las líneas de flujo.



Figuras. 6.1.12. a) Devanado de campo en un rotor cilíndrico. b) Devanado de campo en un rotor de polos salientes.



Figuras. 6.1.13. a) Rotor con ranura bipolar radial. b) Rotor de polos salientes.

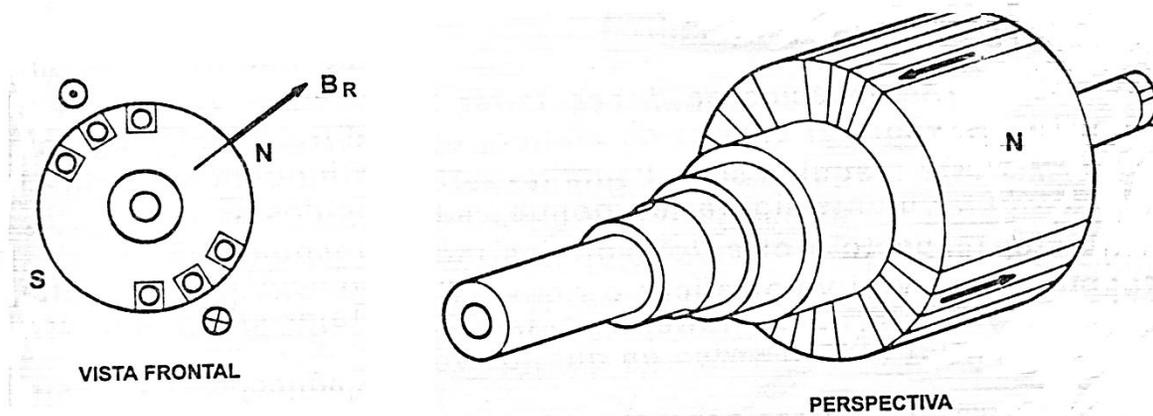


Figura. 6.1.14. Motor de polos lisos para una máquina síncrona.

Ejemplo:

Una turbina hidráulica gira a 200 RPM, está conectada a un generador síncrono. Si el voltaje inducido tiene una frecuencia de 60 Hz, calcular el número de polos que tiene el rotor.

Solución:

De la expresión:

$$f = \frac{P_N}{120}$$

$$P = \frac{120f}{N} = \frac{120 \times 60}{200} = 36 \text{ polos.}$$

Ejemplo:

Un generador de 4 polos opera a 1800 RPM, calcular la frecuencia a la que opera.

Solución:

$$f = \frac{P_N}{120} = \frac{4 \times 1800}{120} = 60 \text{ Hz.}$$

Los generadores trifásicos:

Para un generador trifásico se deben tener tres bobinas que deben estar colocadas sobre el estator de manera que estén separadas 120° eléctricos y a esta máquina se le llama generador trifásico, como se muestra en la siguiente figura, en donde cada bobina está separada 120° una con respecto a otra, los voltajes inducidos son e_a, e_b, e_c en valor instantáneo y el valor eficaz o r.m.s. correspondiente es E_A, E_B, E_C , los índices A,B,C se refieren a la secuencia de los voltajes inducidos, que significa el orden en que los voltajes son generados.

Máquinas eléctricas.

Las tres bobinas del estator generalmente están conectadas en estrella (Y) o también pueden estar conectados en delta (Δ) para producir una fuente de voltaje trifásica, el voltaje inducido en cada bobina del estator se conoce como voltaje de fase E y el voltaje que aparece entre cualquiera de los dos conductores de fase a fase o de línea, se conoce como el voltaje de línea V_L , o bien el voltaje terminal (V_t), cuando se mide en las terminales de la máquina.

La magnitud del voltaje de cada fase es:

$$E_{max} = BM\ell\omega r \text{ (volts)}$$

Dónde:

B_m = Densidad de flujo maxima producida por el rotor (T).

ℓ = Longitud de ambos lados de bobina (m).

ω = Velocidad angular del rotor ($\frac{\text{rad}}{\text{seg}}$).

$$W = 2\pi f$$

r = Radio de la armadura (m).

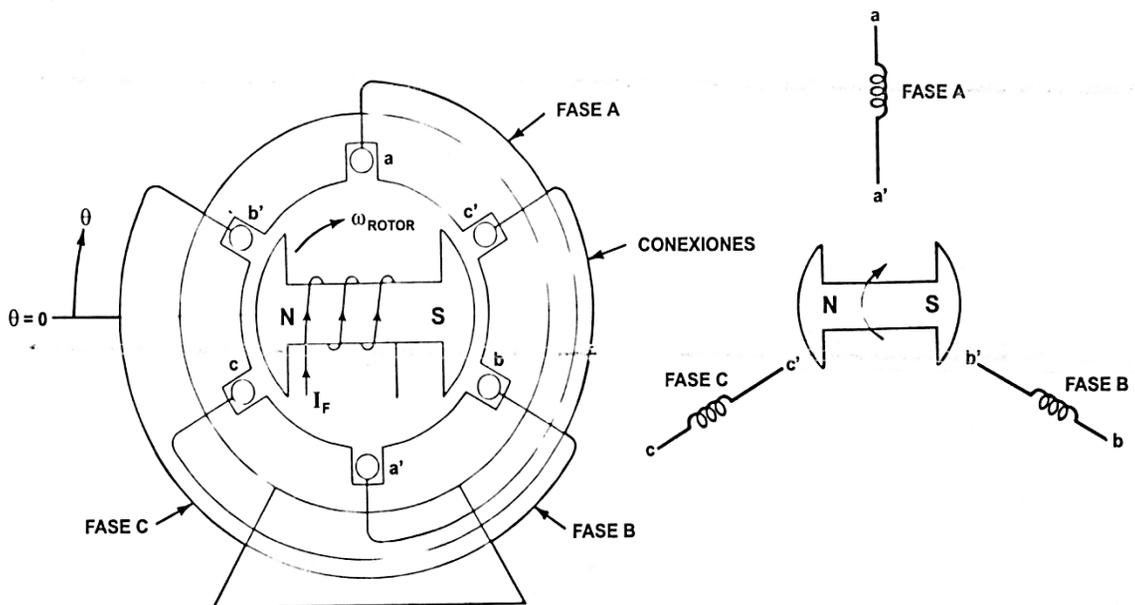


Figura. 6.1.15. Generador trifásico de C.A. de dos polos.

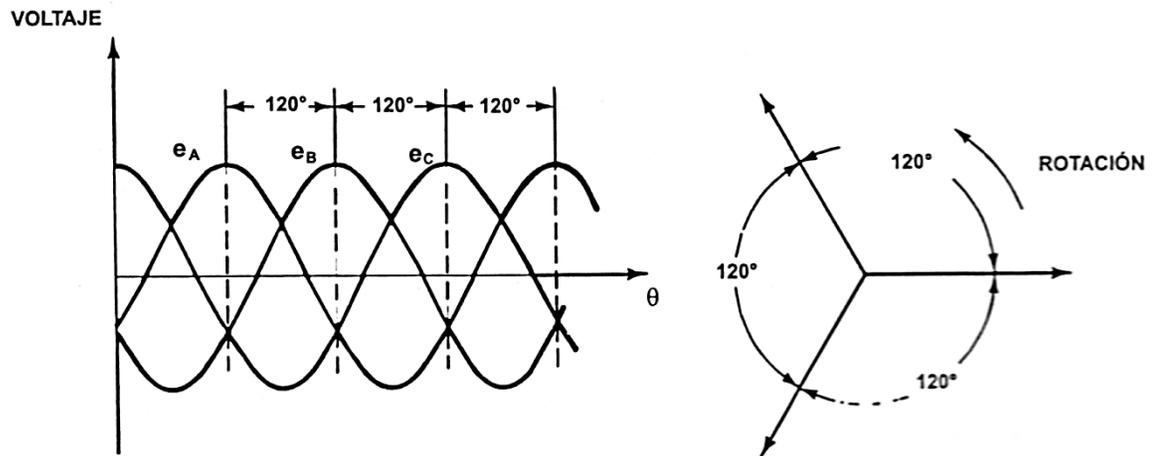


Figura. 6.1.16. Formas de onda del voltaje generado en un generador trifásico.

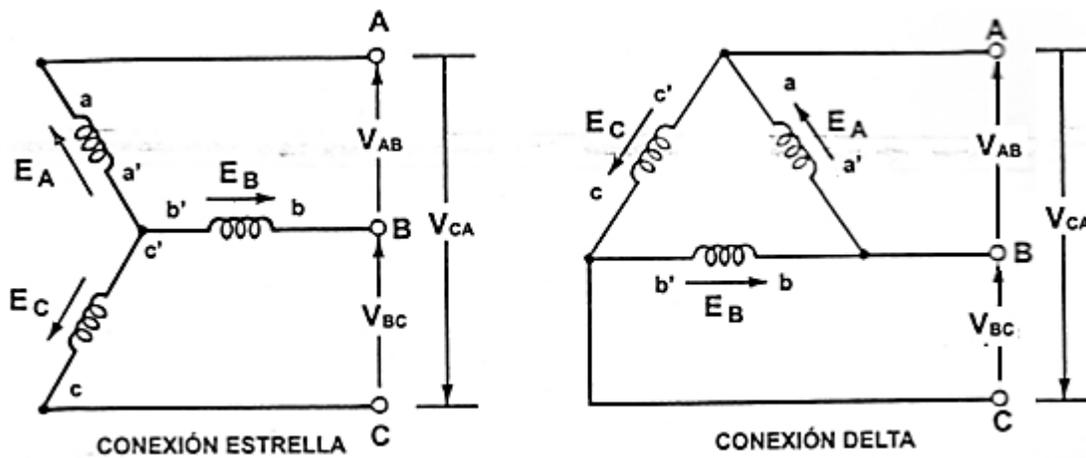


Figura. 6.1.17. Conexiones de las bobinas para formar las fuentes de voltaje trifásicos.

Ejemplo:

Un generador de dos polos genera un voltaje trifásico de secuencia ABC, suponiendo que $B_m = 1.2$ Tesla, la longitud de la armadura $\ell = 0.5$, la velocidad del rotor $N = 1500$ RPM y el diametro interior del nucleo del estator $d = 0.4$ m.

- Calcular la magnitud del voltaje inducido por fase.
- Dar la expresión del voltaje generado en el dominio del tiempo.
- Expresar los valores como fasores.

Solución:

a) La magnitud del voltaje generado se determina a partir de la ecuación:

$$E_{max} = Bm\ell\omega r ; \quad \omega = \frac{2\pi N}{60} = 1.2 \times (0.5 + 0.5) \times \frac{2\pi \times 1500}{60} \times \frac{0.4}{2}$$

Máquinas eléctricas.

$$E_{max} = 37.7 \text{ volts}$$

- b) El voltaje generado es senoidal, si se toma la fase A como referencia, se observa la fase B atrasada por $120^\circ (2\pi/3)$ y la fase c atrasada por $240^\circ (4\pi/3)$, para la velocidad de 1500 RPM con 2 polos para la máquina, la frecuencia correspondiente es:

$$f = \frac{P_N}{120} = \frac{2 \times 1500}{120} = 25 \text{ Hz}$$

Que es la frecuencia del voltaje generado, por lo tanto, la frecuencia angular es:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 25 = 157 \text{ rad/seg.}$$

Si se toma la fase A como referencia

$$e_A = E_{max} \text{ sen } \omega t = 37.7 \text{ sen } 157 t \text{ V}$$

$$e_B = E_{max} \text{ sen } (\omega t - 120^\circ) = 37.7 \text{ sen } (157 t - 120^\circ) \text{ V}$$

$$e_C = E_{max} \text{ sen } (\omega t - 240^\circ) = 37.7 \text{ sen } (157 t - 240^\circ) \text{ V}$$

- c) representando el voltaje como fasores, se requiere conocer el valor rms o eficaz.

$$E_{rms} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{37.7}{\sqrt{2}} = 26.7 \text{ V}$$

Por lo tanto:

$$E_A = 26.7 \angle 0^\circ \text{ V}, \quad E_B = 26.7 \angle -120^\circ \text{ V}, \quad E_C = 26.7 \angle -240^\circ \text{ V}$$

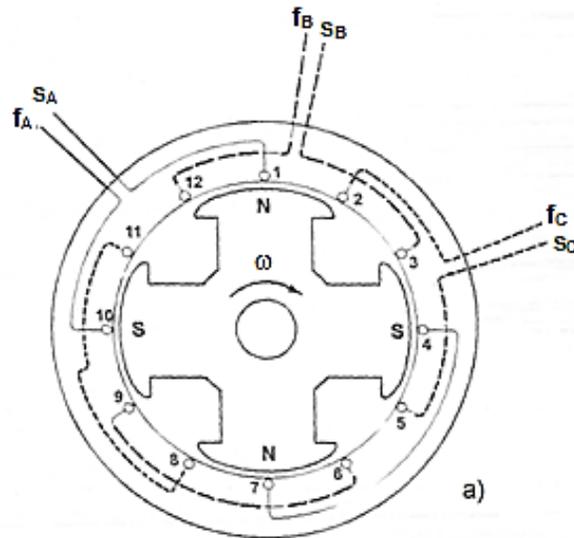
Devanados de armadura:

Hay distintas formas posibles de realizar un devanado de armadura para un generador síncrono, pero la mayoría de ellas caen en dos tipos generales: (1) devanados de capa sencilla y (2) devanados con doble capa. Un devanado trifásico se forma agregando dos o más grupos de bobinas de armadura, desplazadas 120° y 240° eléctricos con respecto a la primera bobina (fase) para producir un sistema de tres voltajes iguales en magnitud y desplazados 120° uno con respecto al otro, para producir un sistema de tres voltajes y una máquina denominada generador trifásico.

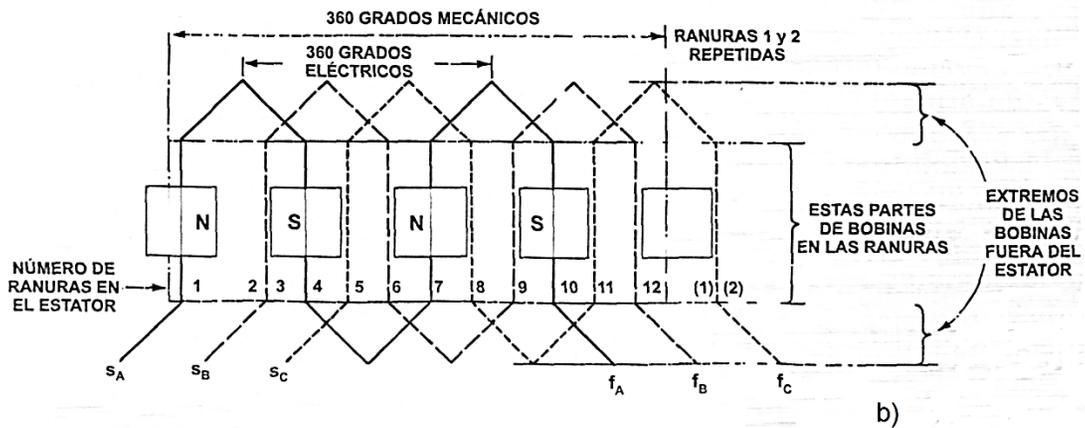
En la siguiente figura, se muestra el devanado desarrollado de un generador trifásico de 4 polos. Hay solo un lado de bobina en cada ranura, haciendo un devanado de una sola capa.

Si los inicios de bobina se designan por S_a, S_b, S_c y las terminaciones son $f_a, f_b, y f_c$, se pueden unir en dos formas, estas son por supuesto la conexión delta (Δ) y la conexión estrella.

Máquinas eléctricas.



Devanado trifásico de capas simples distribuidas en una ranura por polo por fase.



Vista desarrollada del devanado de armadura.

Figuras. 6.1.18. a) y b). Generador trifásico.

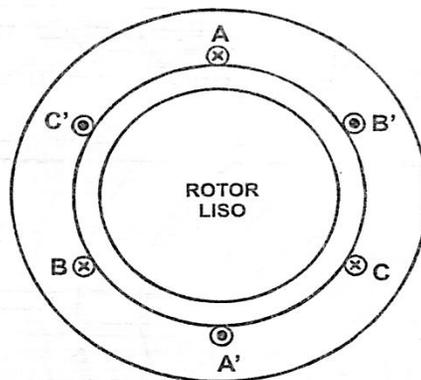


Figura. 6.1.19. Rotor liso de una máquina síncrona.

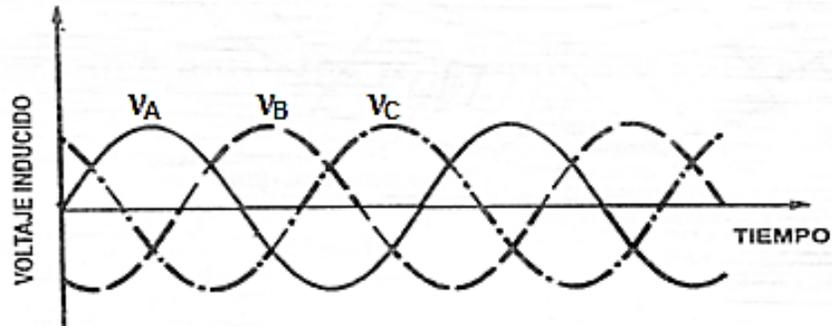


Figura. 6.1.20.

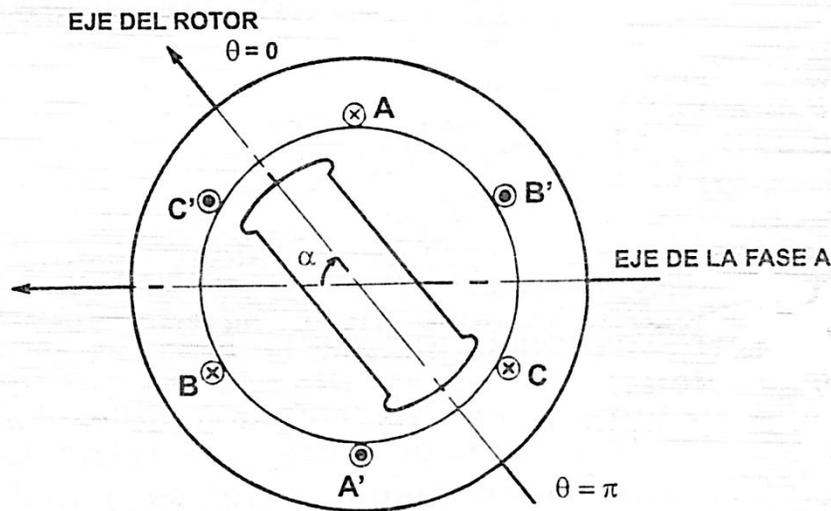
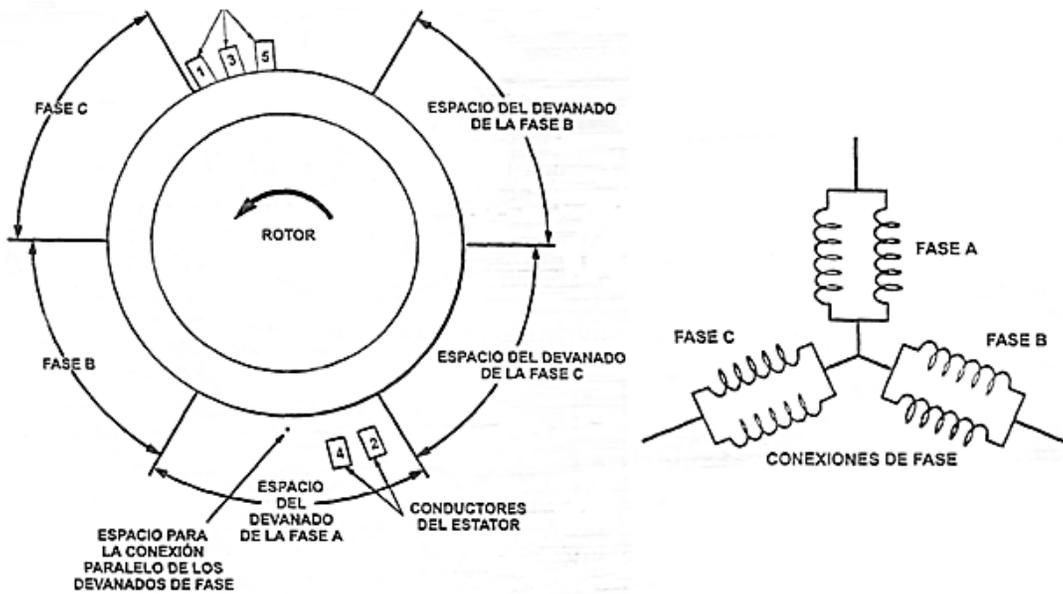


Figura. 6.1.21. Máquina síncrona trifásica con rotor de polos salientes.



Figuras. 6.1.22. Arreglo de los conductores de fase.

Para los devanados de las armaduras trifásicas se pueden hacer algunas observaciones, por ejemplo, la separación entre los devanados de fase es 120° eléctricos o 60 grados mecánicos, esto se concluye de un razonamiento simple, que un ciclo completo de la FEM se genera cuando los cuatro polos del rotor giran 180° mecánicos. Un ciclo completo de la FEM representa 360° eléctricos, extendiendo esto a un generador de P polos (P debe ser siempre un número entero positivo), se tiene la siguiente relación entre el ángulo mecánico del rotor α_{mec} y el ángulo eléctrico X_{elec} .

$$\alpha_{elec} = \frac{P}{2} \alpha_{mec}$$

Ejemplo:

Un generador síncrono trifásico tiene 12 polos, calcular el ángulo mecánico correspondiente a 180 grados eléctricos.

Solución:

el ángulo mecánico entre los polos norte y sur es:

$$\alpha_{mec} = \frac{2(180)_{elec}}{12 \text{ polos}} = 30^{\circ}$$

Esto corresponde a 180° eléctricos, como se puede verificar:

$$\alpha_{elec} = \frac{P}{2} \alpha_{mec} = \frac{12}{2} \times 30^{\circ} = 180^{\circ}$$

El factor de distribución:

Cuando un devanado como el que se ha descrito antes constituido de un cierto número de bobinas colocadas en ranuras separadas, las FEMS generadas en las distintas bobinas por fase no están en fase, en consecuencia, la FEM en terminales es menor que aquella que se ha concentrado en los devanados, el factor por el cual la FEM de un devanado distribuido se debe multiplicar para obtener la FEM_{total} generada se conoce como "factor de distribución" (k_d) para el devanado, este factor es siempre menor que la unidad.

Si se supone que hay ranuras por fase y por polo, la separación entre ranuras en grados eléctricos es entonces:

$$\psi = \frac{180 \text{ grados electricos}}{\eta \times m}$$

Dónde:

$m = \text{numero de fases.}$

Con relación a la siguiente figura, aparentemente la FEM_{inducida} en la ranura 2 se atrasa detrás de la FEM en la ranura 1 por un ángulo $\Phi = 15$ grados eléctricos, la FEM_{inducida} en la ranura 3 será 2Φ grados detrás y en fase, etc. Si se representan estas FEM por

Máquinas eléctricas.

fasores $E_1, E_2, E_3,$ y E_4 respectivamente, se obtiene el diagrama fasorial mostrado en la siguiente figura, la FEM_{total} del estator por fase E, es la suma vectorial de todos los fasores, es decir:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4$$

Está claro que debido al desplazamiento del ángulo Φ la FEM_{total} del estator E es menor que la suma aritmética de la suma de las FEMs de las bobinas por el factor:

$$Kd = \frac{\text{suma vectorial}}{\text{suma aritmetica}} = \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4}{4 \times 1 E_{bobina 1}}$$

Kd se conoce como el factor de distribución y se puede demostrar que:

$$Kd = \frac{\text{sen}\left(\frac{1}{2}\eta m\right)}{\eta \text{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right)}$$

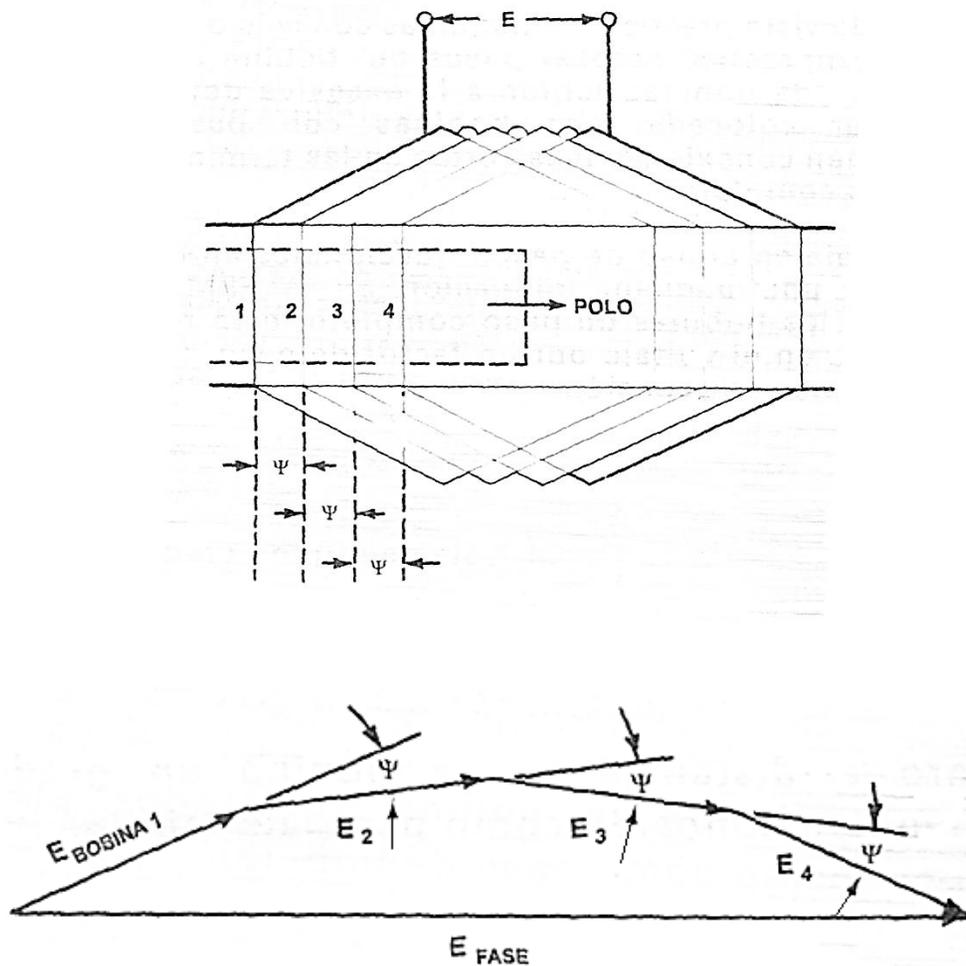


Figura. 6.1.23.

La ventaja real de los devanados distribuidos es la mejoría en la forma de onda del voltaje generado.

Bobinas de paso fraccionario:

En una bobina de paso completo, el voltaje generado en ambos lados de la bobina está en fase, en la práctica, la distancia entre dos lados de bobina está hecha usualmente menor del paso completo. La idea completa es asegurar que la FEM generada sea senoidal, esto se puede lograr usando devanados de paso fraccional, en estas bobinas los lados de bobina están desfasados, el número de FEMS que se deben sumar se duplican y la forma de onda se mejora.

Desde un punto de vista práctico en máquinas con seis o menos polos, es frecuentemente impráctico colocar pasos de bobina completos en la maquina sin dañar la bobina, debido a la excesiva deformación de la bobina para ser colocada. Las bobinas con paso fraccionario normalmente tienen conexiones más cortas en las terminaciones que las bobinas de paso completo.

Hay una desventaja en el uso de pasos fraccionales en las bobinas, en el cual se tiene una pequeña reducción en la FEM generada, en comparación con las bobinas de paso completo, esta reducción en el voltaje se expresa en el voltaje por un factor de paso (K_p), este valor se puede calcular con la ecuación.

$$K_p = \text{sen} \frac{P^0}{2}$$

Dónde:

P^0 = Claro o distancia de la bobina en grados eléctricos (también conocido como paso de bobina).

Ejemplo:

Un generador síncrono de 12 polos, tres fases, tiene 144 ranuras en el estator, el claro de bobina o paso es de 10 ranuras. Calcular el factor de distribución (K_d), el factor de paso (K_p) y el factor devanado ($K_w = K_d \cdot K_p$).

Solución:

El número de ranuras por polo y por fase:

$$\eta = \frac{\text{ranuras}}{\text{No. fases} \times \text{No. polos}} = \frac{144}{3 \times 12} = 4$$

El ángulo eléctrico entre ranuras:

$$\psi = \frac{180}{\eta \times m} = \frac{180}{4 \times 3} = 15^\circ$$

Máquinas eléctricas.

El factor de distribución:

$$Kd = \frac{\text{sen}\left(\frac{1}{2}\eta\psi\right)}{\eta \text{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right)} = \frac{\text{sen}\left(\frac{1}{2} \times 4 \times 15\right)}{4 \text{sen}\left(\frac{15}{2}\right)} = 0.958$$

El paso polar es:

$$\frac{\text{No. de ranuras}}{\text{No. de polos}} = \frac{144}{12} = 12 \text{ ranuras}$$

El paso de bobina en grados eléctricos:

$$P = \frac{\text{paso de bobina}}{\text{paso polar}} \times 180^{\circ} = 150 \text{ grados electricos}$$

Por lo tanto, el factor de paso:

$$Kp = \text{sen}\frac{P^{\circ}}{2} = \text{sen}\frac{150^{\circ}}{2} = 0.966$$

El factor de devanado:

$$K\omega = Kd \times Kp = 0.958 \times 0.966 = 0.925$$

Que representa el factor por el cual el voltaje generado se reduce.

La magnitud del voltaje generado:

La ecuación para determinar el voltaje generado $E_{max} = Bm\ell\omega r$, no se usa en la práctica porque el valor de r no se conoce realmente, por lo tanto, se requiere una expresión alternativa. El valor promedio del voltaje inducido se puede determinar a partir de la expresión para la ley de Faraday:

$$E_{prom} = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ volts}$$

Dónde:

E_{prom} = Voltaje promedio generado en el devanado, (volts).

$\Delta\Phi$ = Cambio del flujo en un tiempo dado (ωb).

Δt = El tiempo en el cual este cambio en el flujo tiene lugar (seg).

N = Numero de espiras en la fase del devanado.

En la siguiente figura, se muestra la bobina de un devanado de armadura que se mueve a través del campo de un polo, que representa un movimiento relativo entre el campo y el devanado.

Máquinas eléctricas.

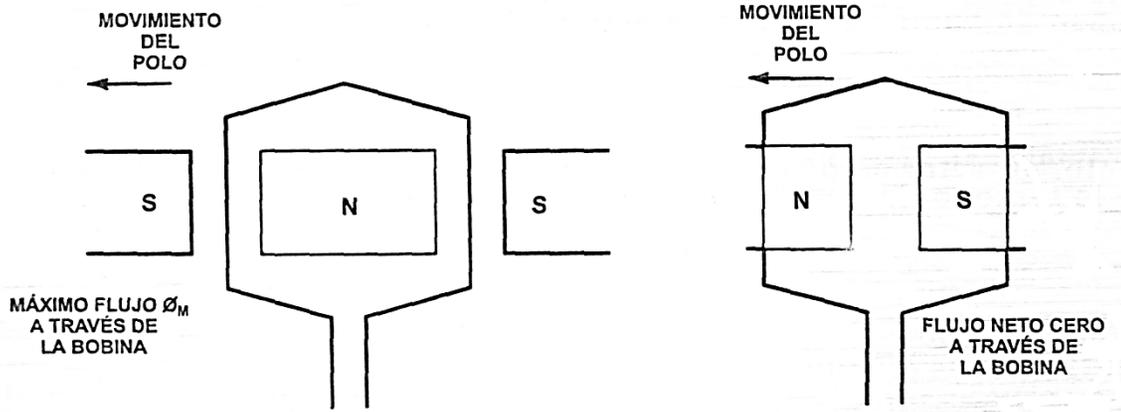


Figura. 6.1.24. Ilustración de los cambios de flujo a través de la bobina, de acuerdo al movimiento de los polos al pasar por la bobina de derecha a izquierda.

En la figura anterior, el flujo que cambia entre las dos posiciones mostradas es Φ_m , en webers, esto implica que un movimiento de un polo es igual a la mitad de un paso polar en el cual un cuarto de un ciclo del voltaje es generado, debido a que un ciclo ocurre en Y_f segundos, el tiempo considerado para esta parte de la forma de onda es: $\frac{1}{4} f$ segundos, por lo tanto, sustituyendo este valor en la ecuación para E_{prom} :

$$E_{prom} = N \frac{\Phi_m}{1/(4f)} = 4fN\Phi_m(\text{volts})$$

La ecuación anterior es la expresión aplicable a todos los generadores en forma independiente de la distribución del flujo en el polo, si la distribución del flujo es senoidal el voltaje generado será senoidal también y se sabe de los circuitos eléctricos que el valor eficaz o rms del voltaje es 1.11 veces el valor promedio, es decir:

$$E = 4.44 f_N \Phi_m(\text{volts})$$

Dónde:

$E =$ Voltaje generado (valor rms) por fase, en volts.

$F =$ Frecuencia del voltaje generado en Hz.

$\Phi_m =$ flujo máximo por polo (wb).

Ejemplo:

Calcular el voltaje efectivo generado en una de las fases de un generador síncrono que tiene los siguientes datos:

$$F = 60 \text{ Hz.}, \quad N = 200 \frac{\text{espiras}}{\text{fase}}, \text{ el flujo máximo por polo es: } \Phi_m = 0.045 \text{ wb}$$

Máquinas eléctricas.

Solución:

El voltaje se calcula con la expresión:

$$E = 4.44\Phi_m f N$$

$$4.44 \times 0.045 \times 60 \times 200 = 2397.6 \text{ volts.}$$

Si el generador está conectado en estrella, el voltaje entre terminales es:

$$V_L = \sqrt{3}E = 1.732 \times 2397.6 = 4152.76 \text{ volts.}$$

Ejemplo:

En un generador de polos salientes de 4 polos, 60 Hz, tiene una distribución de flujo senoidal en el entrehierro con una amplitud de 0.5 Tesla, si la bobina de armadura tiene 200 espiras y la longitud axial de la armadura y su diámetro interior, son ambos de 100 mm. Calcular el valor del voltaje instantáneo y el valor rms del voltaje inducido.

Solución:

El valor instantáneo del voltaje inducido se determina con la ecuación:

$$E_m = \frac{4}{P} B m \omega l r_N \text{ sen } \omega t \text{ (volts)}$$

Sustituyendo valores:

$$E_m = \frac{4}{4} (200)(0.5)(0.100)(0.50)(2\pi \times 60) \text{ sen}(2\pi \times 60)t = 1885 \text{ sen } 377 \text{ volts}$$

También:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{1885}{\sqrt{2}} = 1332.89$$

Ejemplo:

Un generador síncrono trifásico de 4 polos, tiene 60 ranuras, calcular el factor de distribución.

El factor de distribución:

$$K_d = \frac{\text{sen}\left(\frac{1}{2}\eta\psi\right)}{\eta \text{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right)}$$

$$\eta = \frac{\text{No. de ranuras}}{\text{No. fase} \times \text{No. de polos}} = \frac{60}{3 \times 4} = 5$$

Máquinas eléctricas.

El ángulo eléctrico entre ranuras:

$$\psi = \frac{180}{\eta \times m} = \frac{180}{53} = 12^\circ$$

$$Kd = \frac{\text{sen}\left(\frac{1}{2} \times 5 \times 12^\circ\right)}{5 \text{sen}\left(\frac{12}{2}\right)} = 0.9566$$

Ejemplo:

Se tiene un generador trifásico de 8 polos, 60 Hz conectado en estrella, de polos salientes que tiene 96 ranuras con 4 conductores por ranura conectados en serie en cada fase. El paso de bobina es 10 ranuras, si el valor del flujo máximo en el entrehierro es $\Phi_m = 60 \text{ mW}$ y la distribución de este flujo es senoidal, calcular:

- El valor del voltaje por fase.
- El voltaje rms de fase a fase (voltaje de línea).
- Si la corriente por fase es de 500 A, calcular la potencia de la máquina.

- El valor eficaz del voltaje por fase está dado como:

$$E_{max} = E = K\omega(4.44 f_N \Phi_m) \text{volts}$$

Dónde:

$$K\omega = Kd \cdot Kp$$

$$Kd = \frac{\text{sen}\left(\frac{1}{2}\eta\psi\right)}{\eta \text{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right)}$$

$$\eta = \frac{\text{No. de ranuras}}{\text{No. de fases} \times \text{No. de polos}} = \frac{96}{3 \times 8} = 4$$

$$\psi = \frac{180}{\eta \times m} = \frac{180}{4 \times 3} = 15^\circ$$

$$Kd = \frac{\text{sen}\left(\frac{1}{2} \times 4 \times 15\right)}{\eta \text{sen}\left(\frac{15}{2}\right)} = 0.9576$$

El factor de paso KP se calcula como:

$$Kp = \text{sen} \frac{p^0}{2}$$

$$p = \frac{\text{paso de bobina}}{\text{paso polar}} \times 180^\circ$$

$$\text{paso polar} = \frac{\text{No. de ranuras}}{\text{No. de plos}} = \frac{96}{8} = 12$$

Máquinas eléctricas.

$$P = \frac{10}{12} \times 180^\circ = 150^\circ$$

$$Kp = \text{sen} \frac{150^\circ}{2} = 0.9659$$

$$K\omega = Kd \cdot Kp = 0.9576 \times 0.9659 = 0.9249$$

El número de espiras por fase N es la mitad del número de conductores por fase:

$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{96}{3} \right) (4) = 64$$

Por lo tanto:

$$E = \frac{2}{8} \times 0.9249 \times (4.44 \times 60) \times (64) \times (60 \times 10^{-3}) = 236.537 \text{ volts}$$

b) El voltaje de línea.

$$V_L = \sqrt{3}E = \sqrt{3} \times 236.537 = 409.68 \text{ volts}$$

c) La potencia de la máquina.

$$P = 3 E I = 3 \times 236.537 \times 500 = 354.805 \text{ KVA}$$

Caídas de voltaje en el generador:

Cuando se conecta una carga en las terminales de un generador, por ejemplo, si se conecta en un motor trifásico a estas, circula una corriente en el devanado de armadura del generador, este devanado tiene una resistencia de armadura (R_A) en ohm/fase, este da como resultado una caída de voltaje en la armadura.

$$V_A = I_A R_A \text{ Volts/fase}$$

Dónde:

$$I_A = \text{corriente de fase en amperes}$$

$$R_A = \text{Resistencia de armadura} \frac{\Omega}{\text{fase}}$$

Como las tres fases son completamente simétricas, las caídas de voltaje son las mismas en las tres fases, por lo que los cálculos se pueden hacer por fase.

Adicionalmente a la caída de voltaje resistiva hay una caída de voltaje reactiva debida a la inductancia del devanado de armadura, este valor es:

$$V_X = I_A X_A \frac{V}{\text{fase}}$$

Máquinas eléctricas.

Conociendo el valor de estas caídas de voltaje, no se puede considerar como suficiente para calcular el voltaje generado, los voltajes se deben sumar vectorialmente al voltaje terminal, por lo tanto es esencial que para una corriente de carga dada, se deba conocer también el factor de potencia. En la siguiente figura se muestra la dependencia que hay del valor de E_G con el valor del factor de potencia.

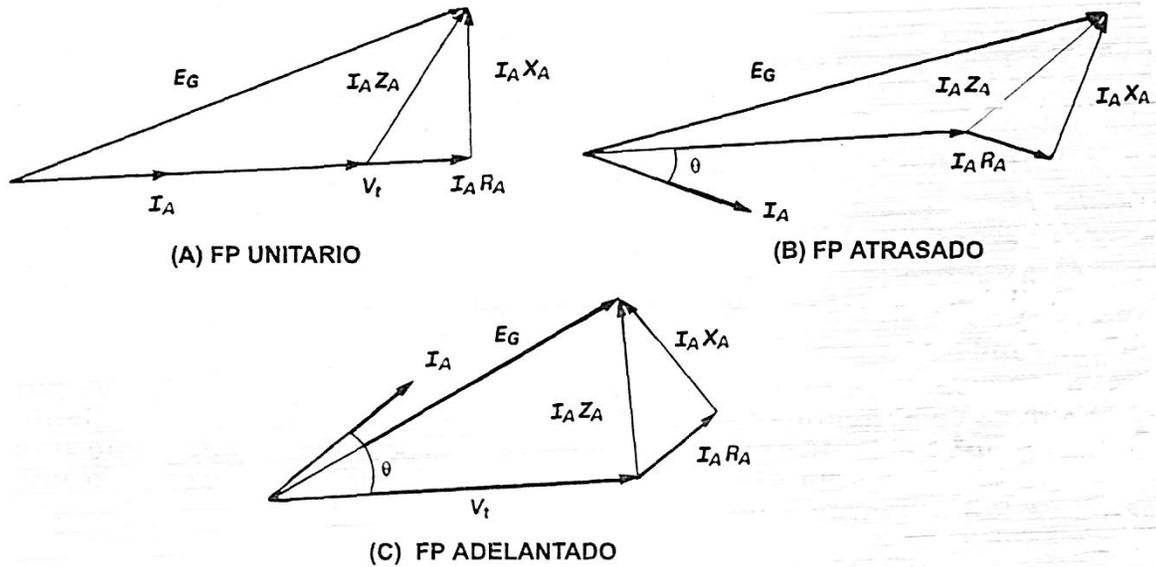


Figura. 6.1.25. Efecto del factor de potencia sobre el voltaje generado considerando la resistencia de armadura y la reactancia.

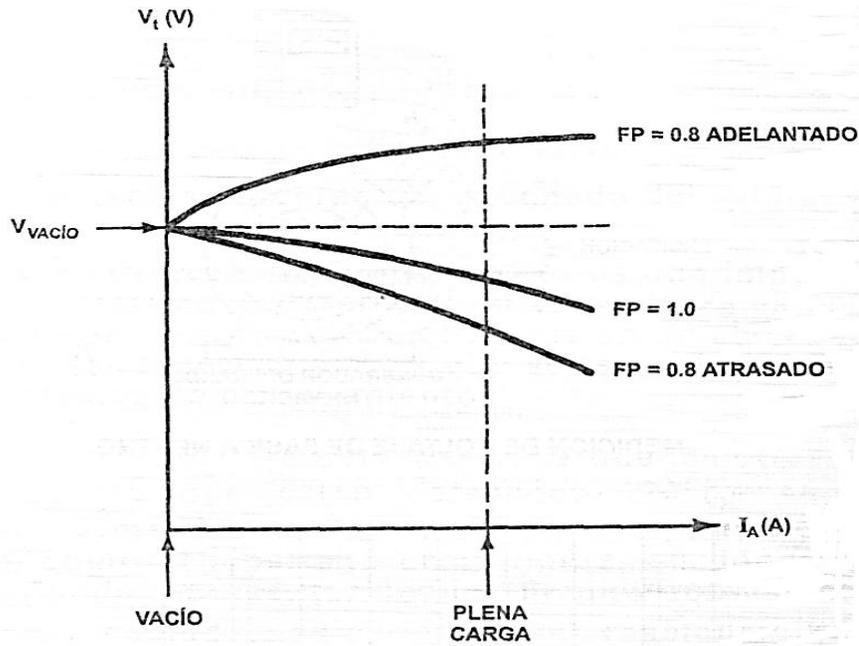


Figura. 6.1.26.

La reactancia síncrona y el circuito equivalente de un generador de corriente alterna: cuando un generador síncrono está operando en vacío y accionado a velocidad constante por un primotor y alimentado por una corriente de excitación I_x que es variable y produce el flujo en el entrehierro. Si se incrementa gradualmente la corriente de excitación y se mide el voltaje en terminales E_o , para pequeños valores de I_x el voltaje se incrementa en forma proporcional a la corriente de excitación, sin embargo, si el fierro se comienza a saturar y el voltaje crece mucho menos para el mismo incremento en la corriente de excitación I_x , de esta manera se obtiene la llamada "curva de saturación" de un generador síncrono.

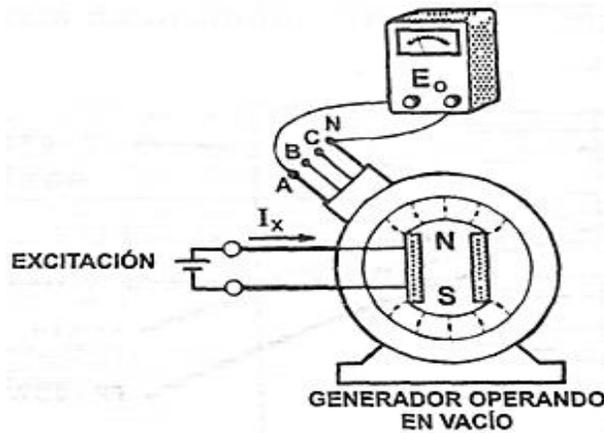


Figura. 6.1.27. Medición de voltaje de fase a neutro.

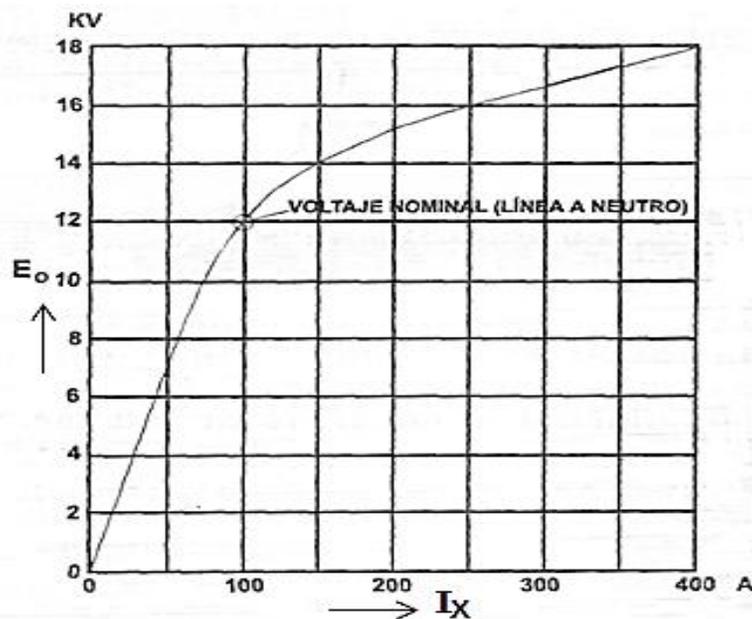


Figura. 6.1.28. Curva de saturación en vacío.

Si se conecta una carga trifásica al generador trifásico y debido a que el devanado del estator tiene una resistencia R y una cierta inductancia L y también porque es una

Máquinas eléctricas.

máquina de corriente alterna, la inductancia se manifiesta como una reactancia X_S dada por la expresión:

$$X_S = 2\pi fL$$

Dónde:

$X_S =$ Reactancia sincrona por fase (Ω).

$f =$ Frecuencia del generador en Hertz.

$L =$ Inductancia aparente del devanado del estator por fase (H).

La reactancia síncrona de un generador es una impedancia interna, justo como su resistencia interna R , el valor de X_S es en forma típica de 10 a 100 veces mayor que R , por lo que en muchos casos se puede despreciar la resistencia, a menos que se tenga interés en pérdidas y eficiencia o efectos de calentamiento.

Si se muestra una sola fase del estator, ya que las otras dos fases son idénticas, excepto que están desfasadas 120° y se desprecia la resistencia de armadura por fase, se logra un circuito del devanado muy simple, como el mostrado en la figura, en donde un generador síncrono se puede representar por un circuito equivalente compuesto por un voltaje inducido E_0 en serie con una reactancia X_S .

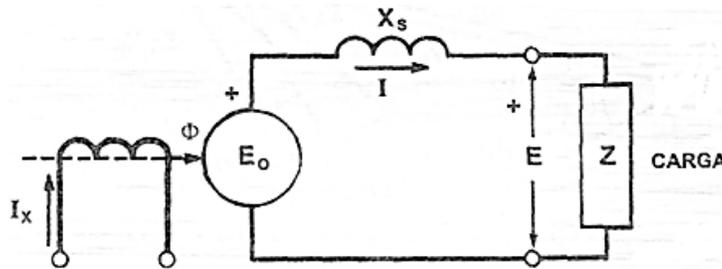


Figura. 6.1.29. Circuito equivalente de un generador trifásico mostrando una fase.

La regulación de voltaje:

Es claro que cuando se hace referencia a la reactancia síncrona (X_S) que se puede expresar como la suma de la reactancia de la armadura (X_A) y la reactancia debida a la reacción de armadura (X_{AR}).

$$X_S = X_A + X_{AR}$$

Si se designa como V_t el voltaje de referencia entonces se puede determinar el voltaje de armadura E_G , también denominado de vacío E_0 , en forma fasorial.

$$E_G = V_t + I_A Z_S$$

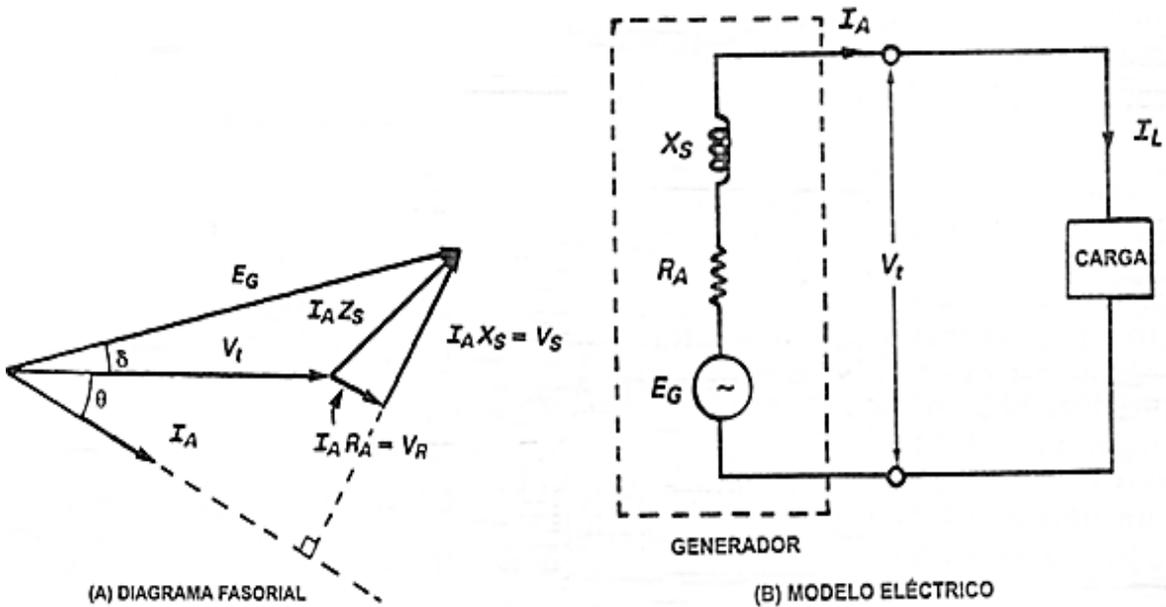
Dónde:

$Z_S =$ Impedancia de la armadura.

$$Z_S = R_A + jX_S$$

Máquinas eléctricas.

En la siguiente figura, se muestra el circuito y diagrama fasorial, donde se muestra que la representación más elemental de un generador síncrono es por medio de un circuito R-L, la resistencia representa la resistencia del devanado de armadura (R_A) y la reactancia representa la reactancia síncrona (X_S), ambas cantidades son por fase. El ángulo del factor de potencia (θ) en el circuito está determinado por la carga conectada a las terminales del generador.



Figuras. 6.1.30. (A) y (B). Circuito equivalente de C.A. simplificado (monofásico) para un generador síncrono.

La potencia consumida por la carga es:

$$P_L = V_t I_A \cos \theta \frac{\text{watts}}{\text{fase}}$$

Como la máquina se trata de un generador trifásico:

$$P_L = 3V_t I_A \cos \theta \text{ watts}$$

En general se especifica la potencia en términos de las cantidades de línea, que son la corriente de línea I_L y el voltaje de línea V_L (entre terminales), para convertir la ecuación anterior a estos valores, es necesario conocer la forma en cómo se encuentran conectados los devanados del generador.

Cuando los devanados de armadura están conectados en estrella (Y), que representa la conexión más común para los generadores, se tiene que:

$$I_A = I_L, V_t = V_L / \sqrt{3}$$

Máquinas eléctricas.

Sustituyendo estas relaciones en la ecuación para la potencia trifásica:

$$P = 3 V_t I_A \cos \theta$$

$$P_L = \frac{3V_L}{\sqrt{3}} I_L \cos \theta = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$$

Esta ecuación representa la expresión general para la potencia trifásica, la ecuación anterior permite obtener la potencia recibida o entregada en un sistema trifásico y es independiente de la conexión del devanado de armadura o de la carga.

Para calcular la regulación de voltaje se requiere el voltaje generador E_G , esto se puede calcular de la ecuación: L_A escribiendo Z_S en la forma fasorial.

$$I_A = I_A \angle -\theta \quad Y \quad Z_S = R_A + jX_S = Z_S \angle \beta$$

V_t se toma como fasor de referencia, lo cual significa $V_t = V_t \angle 0^\circ$ y $\beta = \tan^{-1} \left(\frac{X_S}{R_A} \right)$, por lo tanto, para cargas inductivas que están caracterizadas por un factor de potencia atrasado se tiene:

$$E_G = V_t \angle 0^\circ + I_A \angle -\theta \times Z_S \angle \beta$$

Cuando la carga es capacitiva, entonces la corriente de armadura se adelanta al voltaje terminal, si se toma nuevamente el voltaje terminal como referencia se tiene:

$$E_G = V_t \angle 0^\circ + I_A \angle \theta \times Z_S \angle \beta$$

Cuando la carga es puramente resistiva, el factor de potencia es unitario y $\theta = 0^\circ$ con lo cual la expresión de E_G se simplifica.

$$E_G = V_t + I_A Z_S \angle \beta$$

La regulación de voltaje se calcula entonces como:

$$\text{Regulación de voltaje} = \frac{E_G - V_t}{V_t} \times 100$$

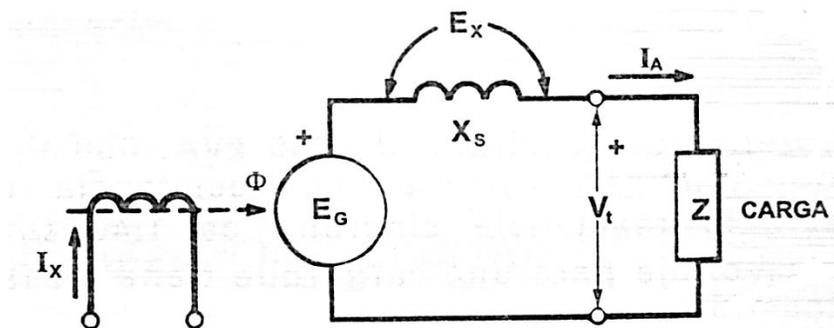


Figura. 6.1.31. Circuito equivalente del generador bajo carga.

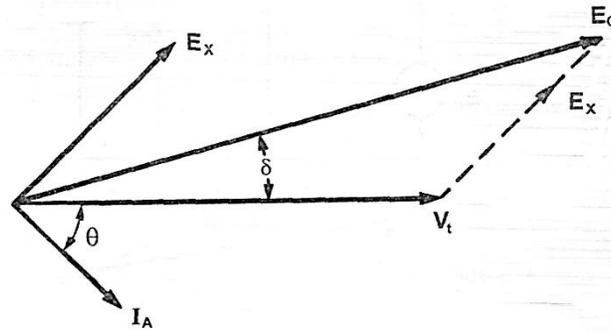


Figura. 6.1.32. Diagrama fasorial para una carga con factor de potencia atrasado.

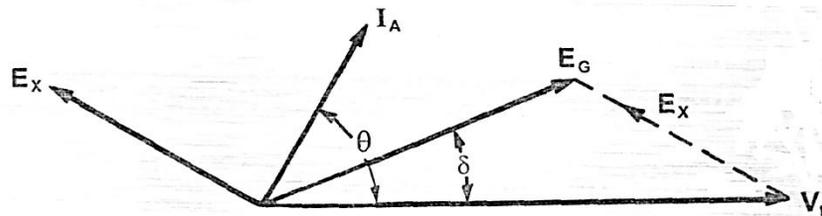
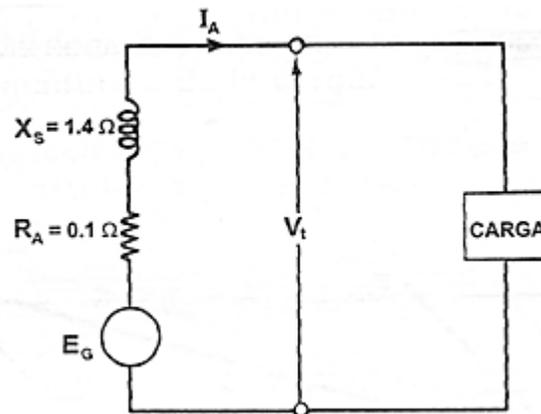


Figura. 6.1.33. Diagrama fasorial para una carga con factor de potencia adelantado.

Ejemplo:

Se tiene un generador síncrono de 250 kVA, 660 V entre terminales, trifásico conectado en estrella. La resistencia de armadura es $0.10 \Omega/fase$ y la reactancia síncrona es $1.40 \Omega/fase$, calcular la regulación de voltaje para una carga que tiene un factor de potencia de 0.866 atrasado.



Circuito equivalente.

Solución:

como se ha indicado antes, todos los cálculos se hacen sobre la base de referencia por fase, debido a que el cambio de voltaje es el mismo que aquel obtenido entre las terminales de línea, la corriente de armadura a plena carga es:

Máquinas eléctricas.

$$I_A = \frac{KVA \times 1000}{\sqrt{3} \times V_L} = \frac{250,000}{\sqrt{3} \times 660} = 219 \text{ A}$$

El voltaje en terminales de fase a tierra es:

$$V_t = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} = 381 \text{ V/fase}$$

A factor de potencia 0.866 atrasado: $\theta = \cos^{-1}0.866 = 30^\circ$

El valor de la impedancia:

$$Z_S = \sqrt{R_A^2 + X_S^2} \angle \tan^{-1} \frac{X_S}{R_A}$$

$$Z_S = \sqrt{(0.01)^2 + (1.4)^2} \angle \tan^{-1} \frac{1.4}{0.10} = 1.404 \angle 85.9^\circ$$

Por lo tanto:

$$E_G = 381 \angle 0 + 219 \angle -30^\circ \times 1.404 \angle 85.9^\circ = 381 + 307.5 \angle 55.9^\circ = 609.2 \angle 24.7^\circ$$

La regulación de voltaje:

$$\text{Regulación de voltaje} = \frac{609.2 - 381}{381} \times 100 = 59.9\%$$

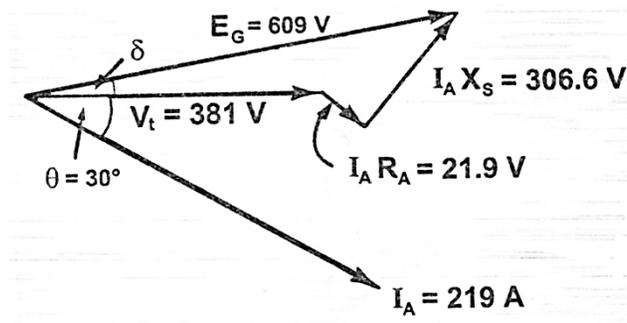


Diagrama fasorial correspondiente.

La reactancia e impedancia síncrona de un generador:

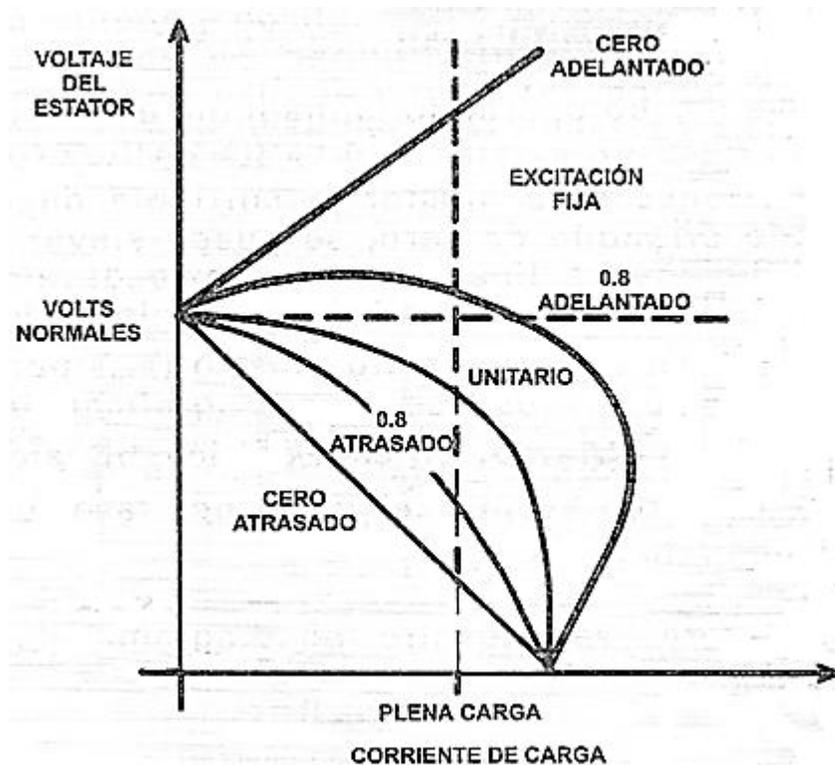
En este párrafo la forma en como los parámetros del circuito equivalente del generador síncrono se obtienen. Del ejemplo anterior, se puede observar que prácticamente para cualquier carga dada la regulación de voltaje se puede determinar, siempre que se disponga del modelo o circuito eléctrico de la máquina. Para determinar la regulación de voltaje en las grandes máquinas, en forma experimental es prácticamente imposible de llevar a cabo, ya que se requerirían las condiciones de plena carga, mientras se manifiesten el voltaje terminal, frecuencia y el factor de potencia predeterminado en la carga.

Máquinas eléctricas.

En la práctica real, la regulación se calcula de los datos obtenidos de una serie de pruebas relativamente simples para obtener los parámetros del circuito equivalente. Las cantidades que se deben determinar son: (1) la reactancia síncrona, X_S y (2) la resistencia de armadura R_A , ambas cantidades por fase.

Existen distintos métodos para determinar la reactancia síncrona, pero solo se discutirá uno, conocido como “el método de la impedancia síncrona”. Para obtener los datos necesarios se requieren tres pruebas simples:

1. La prueba de circuito abierto.
2. La prueba de cortocircuito.
3. La prueba de resistencia de armadura.



A) Cambio de voltaje.

Prueba de cortocircuito:

Con referencia a la siguiente figura, las terminales del generador están en cortocircuito, con un amperímetro conectado en una de sus líneas, la corriente de campo se reduce a cero y el generador opera a su velocidad nominal, entonces la corriente de campo se incrementa gradualmente hasta un valor máximo de corriente de armadura seguro que se pueda obtener, posiblemente a dos veces su valor nominal, teniendo cuidado de no permitir que esta corriente de armadura permanezca con altos valores por largos periodos de tiempo. En la siguiente figura, se muestran las conexiones para la prueba.

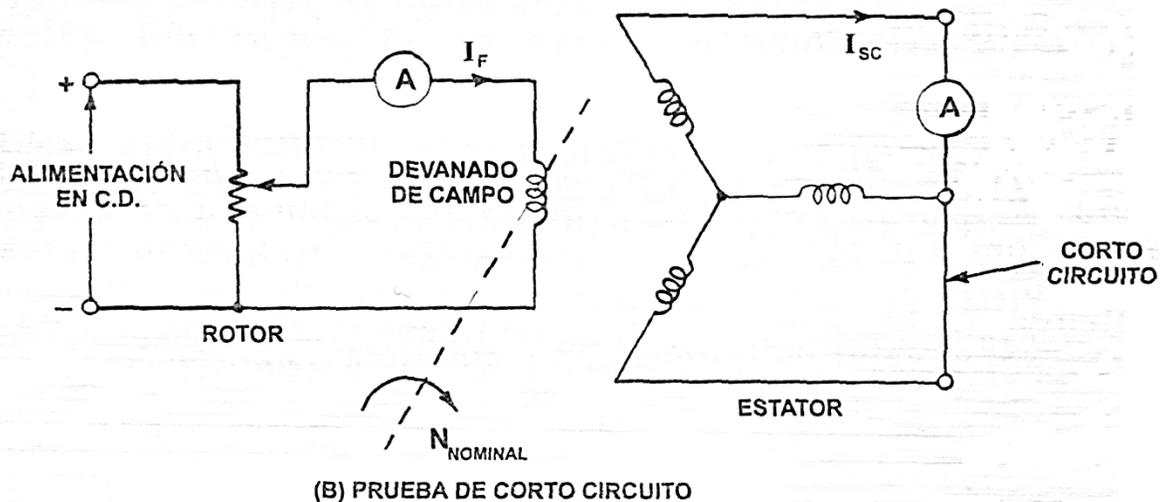


Figura. 6.1.36. Circuito equivalente para un generador síncrono bajo prueba.

Durante esta prueba los valores de la corriente de excitación o campo I_F y de la corriente de cortocircuito se registran y graficando $I_F V_S I_{CC}$ se obtiene la característica de cortocircuito. Se observa durante la prueba que con las terminales en cortocircuito el voltaje generado es igual a la caída de voltaje por impedancia síncrona y cuando se retira la conexión de cortocircuito el voltaje que aparece en terminales es el de vacío, de manera que el valor de la impedancia síncrona se obtiene para un valor dado de I_F , de acuerdo con la ecuación:

$$Z_S = \frac{E_{G0}}{I_{CC}} \text{ con } I_F = \text{constante.}$$

Prueba de resistencia:

Una vez que se ha determinado la impedancia síncrona (Z_S), la reactancia síncrona (X_S) se puede calcular, si se conoce el valor de la resistencia de armadura (R_A), este valor se puede determinar con una prueba sencilla de medición de resistencia, para esto, supóngase que el generador está conectado en estrella, esta suposición no afecta de ninguna manera el resultado final, ya que se obtiene una regulación de voltaje idéntica si la conexión es en delta.

Máquinas eléctricas.

Con el devanado de campo abierto se mide el valor de la resistencia en corriente directa, entre cualquiera de las dos terminales de salida, debido a que durante esta prueba dos fases están en serie, el valor de la resistencia de armadura por fase es la mitad del valor medio.

En la práctica, el valor medio se multiplica por un factor para pasar del valor medio de resistencia en C.D. al valor de resistencia de armadura en C.A. (R_A), este factor depende del tamaño de la ranura y su forma, del tamaño de los conductores de armadura y de la construcción particular del devanado. El valor de este factor, dependiendo del tamaño de la máquina, está entre 1.2 y 1.5, un valor típico es 1.25, el valor de la reactancia síncrona es entonces:

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_A^2}$$

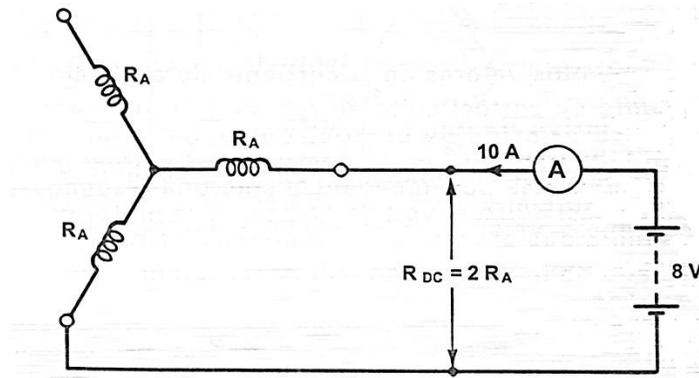


Figura. 6.1.37. Medición de resistencia en C.D.

Ejemplo:

Un generador trifásico síncrono de 500 KVA, 2300 V, se probó de acuerdo con los procedimientos de prueba descritos antes para calcular la regulación de voltaje a plena carga y factor de potencia 0.866 atrasado la conexión es estrella. Los datos obtenidos de la prueba son:

Prueba de resistencia en C.D.: $V_{LL} = 8 V$, $I_L = 10 A$

Prueba de circuito abierto: $I_f = 25 A$, $V_{LL} = 1408 V$

Prueba de cortocircuito: $I_f = 24 A$, $I_{CC} = 126 A = \text{corriente a plena carga.}$

Solución:

El voltaje en vacío:

$$V_{OC} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{1408}{\sqrt{3}} = 812.9 \frac{\text{volts}}{\text{fase}}$$

Máquinas eléctricas.

La impedancia síncrona:

$$Z_s = \frac{V_{oc}}{I_{cc}} = \frac{812.9}{126} = 6.45 \Omega$$

La resistencia de armadura, ya expresada en C.A.:

$$R_A = 1.25 \times \frac{8 V}{2 \times 10 A} = 0.50 \Omega$$

1.25 = Factor de corrección para la resistencia en C.D. a C.A.

Y está dividida entre 2 porque se mide entre dos fases la resistencia.

El valor de la reactancia síncrona es entonces:

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_A^2} = \sqrt{(6.45)^2 - (0.5)^2} = 6.43 \Omega$$

El ángulo es entonces:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{6.43}{0.50} \right) = 85.6^\circ$$

El voltaje en terminales:

$$V_t = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = 1328 V / \text{fase a plena carga}$$

El voltaje generador por fase, usando V_t como referencia y $\theta = \cos^{-1} 0.866 = 30^\circ$ es entonces:

$$E_G = 1328 \angle 0^\circ + 126 \angle -30^\circ \times 6.45 \angle 85.6^\circ = 1787.1 + j670.6 = 1909 \angle 20.6^\circ V$$

La regulación de voltaje es entonces:

$$\text{Regulación de voltaje} = \frac{1909 - 1328}{1328} \times 100 = 43.8\%$$

Ejemplo:

Considérese un generador síncrono trifásico conectado en estrella, de 10 MVA, 6.6 kV entre fases con una resistencia de armadura $R_A = 0.13 \Omega / \text{fase}$ que tiene los siguientes datos para las pruebas de circuito abierto y de cortocircuito:

Corriente de campo (A)	25	50	75	100	125	150	175	200	225
Voltaje de línea (V)	2.4	4.8	6.1	7.1	7.6	7.9	8.3	8.5	8.7
Corriente de cortocircuito C.A.	288	582	875						

Estos datos se muestran en la siguiente figura:

Máquinas eléctricas.

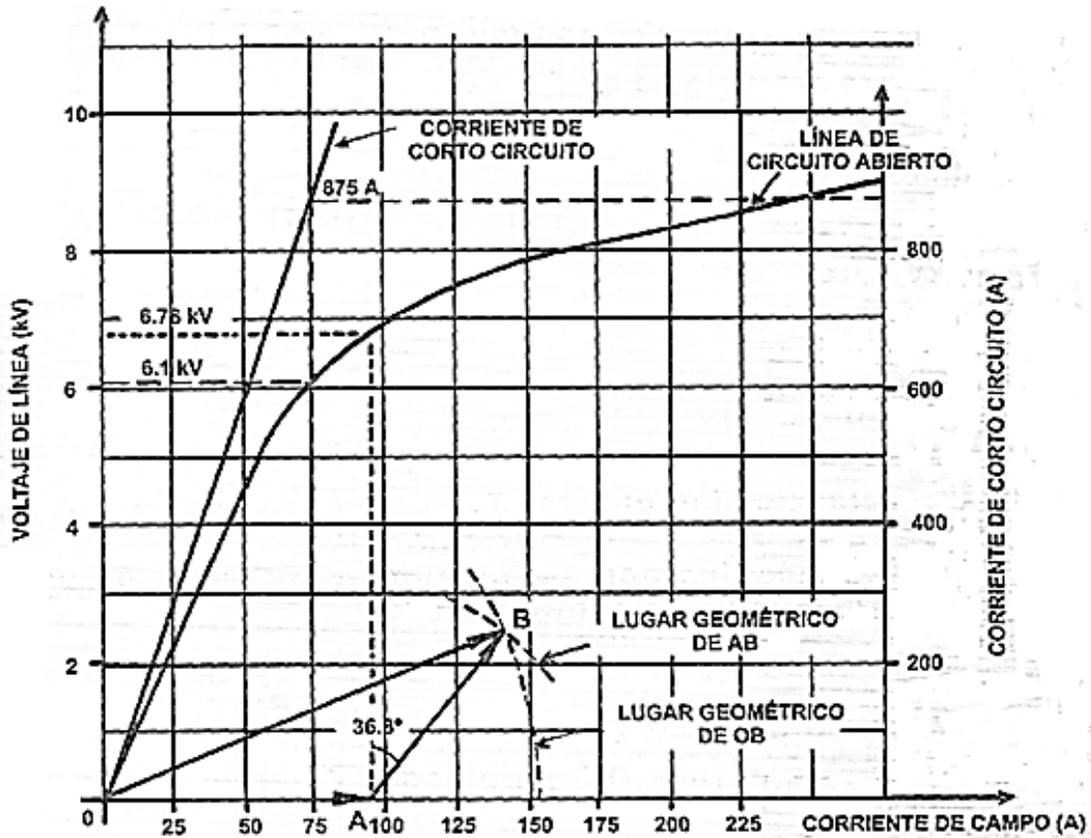


Figura. 6.1.38. Cálculo de referencia.

Calcular la regulación de voltaje.

La corriente a plena carga:

$$I = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 6.6 \times 10^3} = 875 \text{ A}$$

El voltaje de fase a neutro:

$$\frac{6.6 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 3.81 \text{ kV/fase}$$

De la curva de pruebas de vacío y cortocircuito, para una corriente de 875 A, la corriente de campo es 75 A. Este valor de corriente produce una tensión de circuito abierto de 6.1 kV.

Máquinas eléctricas.

La impedancia síncrona es:

$$Z_S = \frac{E_0}{I_{CC}} = \frac{E_A}{I_{CC}}$$

$$Z_S = \frac{6.1}{\frac{\sqrt{3}}{875}} = 4.02 \Omega$$

El valor de la reactancia es: $X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_A^2} = \sqrt{(4.02)^2 - (0.13)^2} \cong 4.02 \Omega$ suponiendo que la máquina opera a plena carga y factor de potencia 0.8 atrasado, como se indica a continuación.

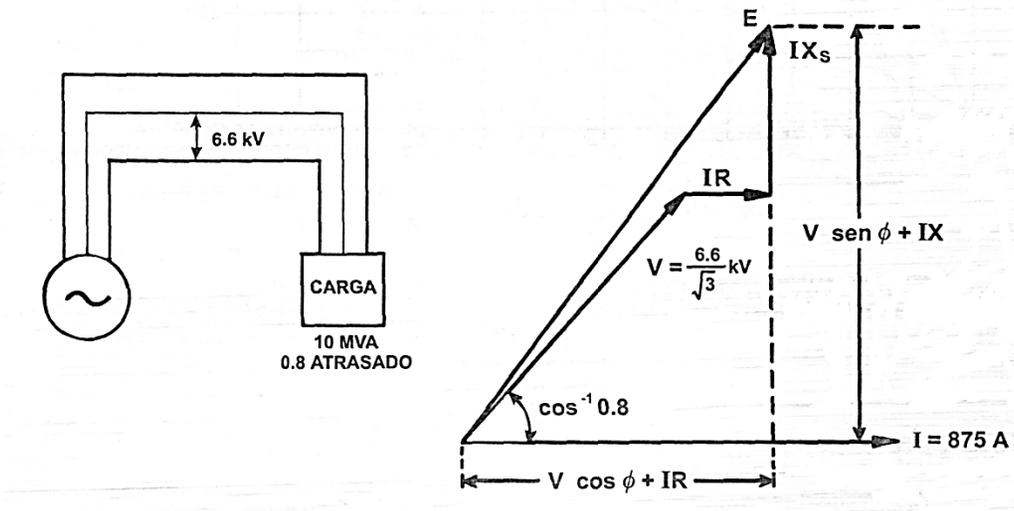


Diagrama fasorial.

Las componentes del diagrama fasorial:

$$V \cos \theta + I_R = \frac{6.6 \times 10^3}{\sqrt{3}} = \times 0.8 + 875 \times 0.13 = 3162 V$$

$$V \sin \theta + I X_S = \frac{6.6 \times 10^3}{\sqrt{3}} = \times 0.6 + 875 \times 4.02 = 5803.9 V$$

De aquí:

$$E_A = \sqrt{(3162)^2 + (5803.9)^2} = 6609 V/fase$$

$$E_A = 1.732 \times 6609 = 11.45 kV_{linea}$$

Por lo tanto la regulación:

$$Regulación = \frac{11.45 - 6.6}{6.6} \times 100 = 73.5\%$$

Máquinas eléctricas.

Ejemplo: para un generador trifásico de 500 KVA, 2300 volts entre terminales, se midió la resistencia promedio en C.D. entre pares terminales es $R_A = 0.8 \Omega$.

- Calcular los valores de Z_S y X_S (suponiendo que la resistencia de armadura en C.A. es 1.5 veces el valor de resistencia en C.D.
- Si el generador está conectado en estrella y tiene una caída de voltaje a corriente de plena carga de 50 volts en la resistencia de armadura (por fase) y una caída de voltaje combinada resistencia-reactancia (E_X) más la reacción de armadura (E_{AR}) de 500 volts.

Para los datos anteriores, usando los valores de R_A y X_S calculados en (a), calcular el porcentaje de regulación a plena carga y un factor de potencia de 0.8 atrasado.

Las características de cortocircuito y de vacío se dan a continuación:

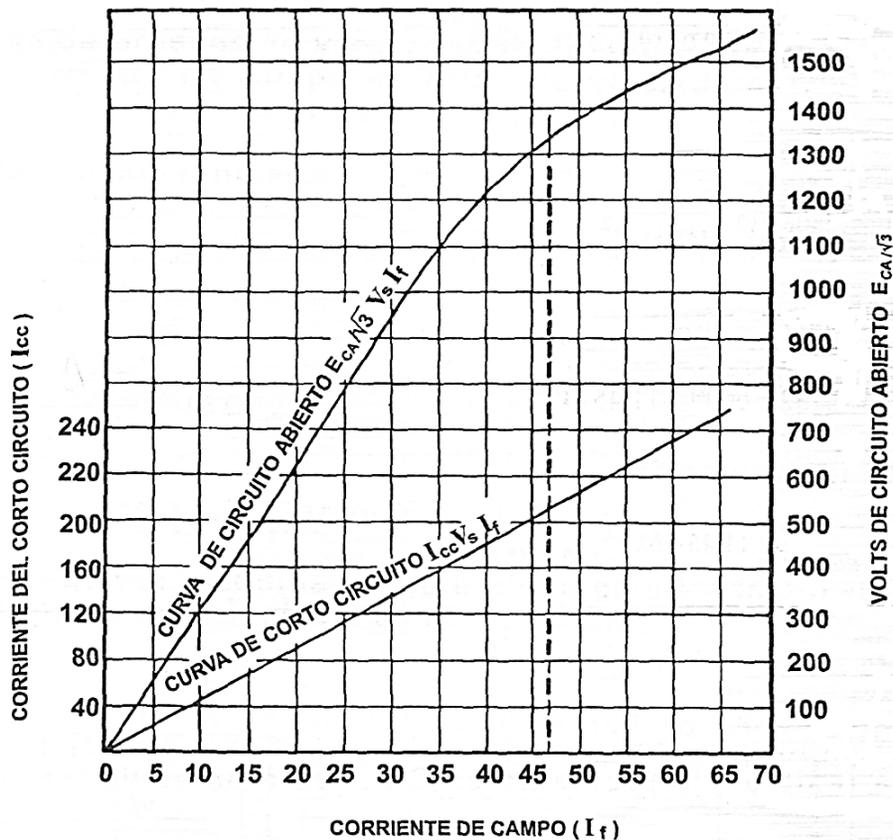


Figura. 6.1.39. Curva de corto circuito y de circuito para un alternador.

Solución:

- De las curvas para la prueba de cortocircuito y de vacío (circuito abierto), para el valor de $V_t/\sqrt{3}$, $2300/\sqrt{3} = 1330 \text{ volts}$; $V_t = E_{CA}$

Entrando con 1330 V de circuito abierto, se corta la curva de circuito abierto, en el punto de corte se baja y se corta la recta o curva de cortocircuito y de aquí a la escala de la izquierda de corriente de corriente de cortocircuito donde se encuentra: $I_{CC} = 204 A$.

De estos valores se tiene que la impedancia síncrona es:

$$Z_S = \frac{E_{ac}}{I_{CC}} = \frac{1330}{204} = 6.52 \Omega$$

La resistencia de armadura en corriente alterna.

$$R_A = 1.5 \times \frac{0.8}{2} = 0.6$$

(Se divide entre 2 porque R_{CD} se mide entre un par de terminales)

Como: $Z_S = \sqrt{R_A^2 + X_S^2}$ la reactancia síncrona es:

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_A^2} = \sqrt{(6.52)^2 - (0.6)^2} = 6.5 \Omega$$

b) La corriente de línea a plena carga es:

$$I_L = \frac{500,000}{\sqrt{3} \times 2300} = 126 A$$

La caída de voltaje por resistencia:

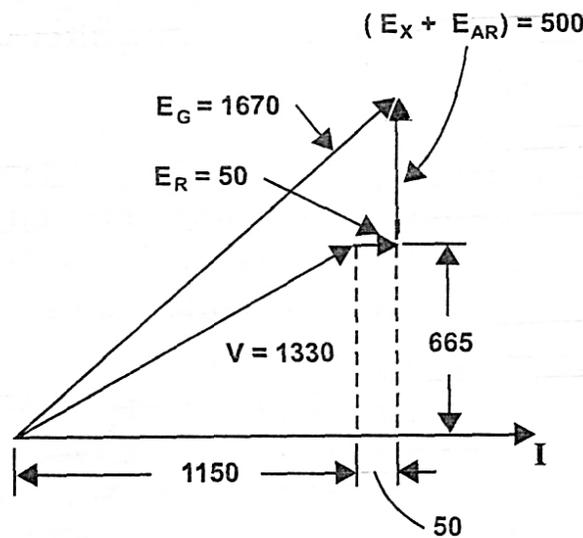
$$E_R = 126 \times 0.6 = 75 \text{ volts}$$

La caída de voltaje por reactancia síncrona:

$$I_L X_S = 126 \times 6.5 = 820 \text{ volts}$$

El voltaje en la armadura a factor de potencia 0.8 atrasado es:

$$E_A = \sqrt{[(1330 \times 0.8) + 75]^2 + [(1330 \times 0.6) + 820]^2} = \sqrt{(1139)^2 + (1618)^2} = 1980 \text{ volts.}$$



ÁNGULO DE FACTOR DE POTENCIA = 30°

$$\cos 30^\circ = 0.866$$

$$\text{sen } 30^\circ = 0.5$$

Diagrama fasorial.

La regulación de voltaje se calcula como:

$$\text{Regulación de voltaje} = \frac{1980 - 1330}{1330} \times 100 = 48.8\%$$

Ejemplo:

Se tiene un generador síncrono trifásico con rotor cilíndrico de 1500 MW, factor de potencia 0.85 atrasado, 12.6 kV, 60 Hz, 1800 RPM. Cada devanado tiene una resistencia de línea a neutro de $R_A = 1.535 \text{ m}\Omega$, los datos para la curva de magnetización de vacío son los siguientes:

Corriente de campo	200	300	400	500	600	700	800	900
Voltaje de armadura	3.8	5.8	7.8	9.8	11.3	12.6	13.5	14.2

Los datos de la curva de saturación y datos de pruebas de cortocircuito se dan en la siguiente figura:

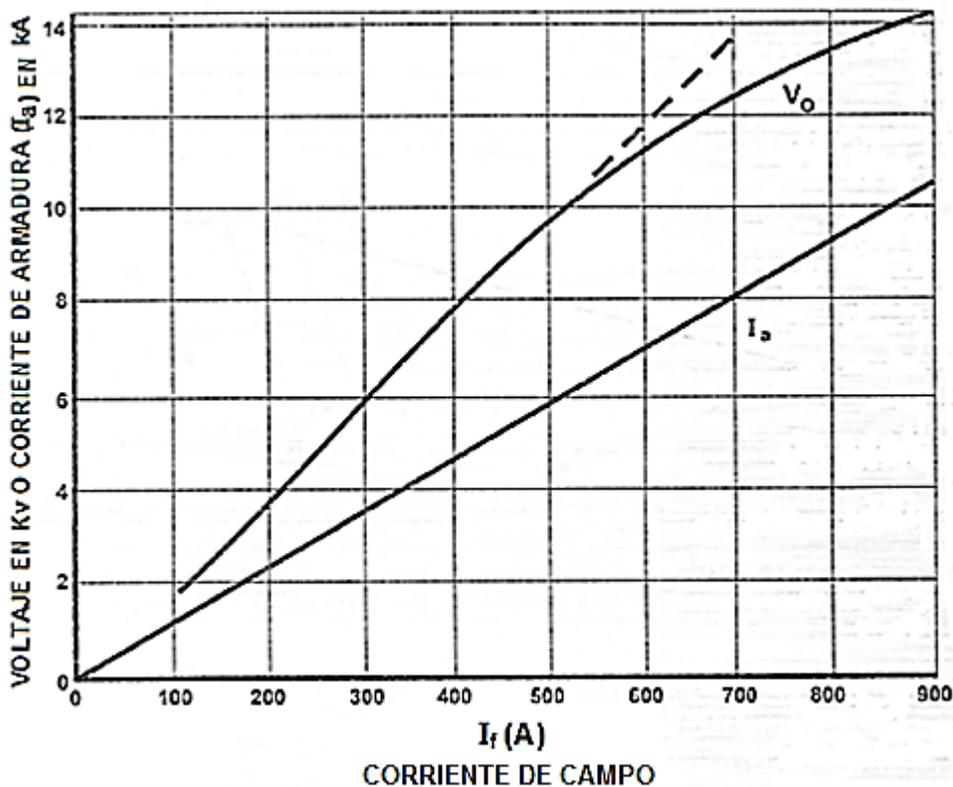


Figura. 6.1.40.

Calcular la regulación de voltaje para carga con $\cos \theta = 0.85$ atrasado.

Solución:

La corriente de armadura por fase:

$$I_a = \frac{(150 \times 10^6)/3}{[(12.6 \times 10^3)/\sqrt{3}] \times 0.85} = 8086 \text{ A}$$

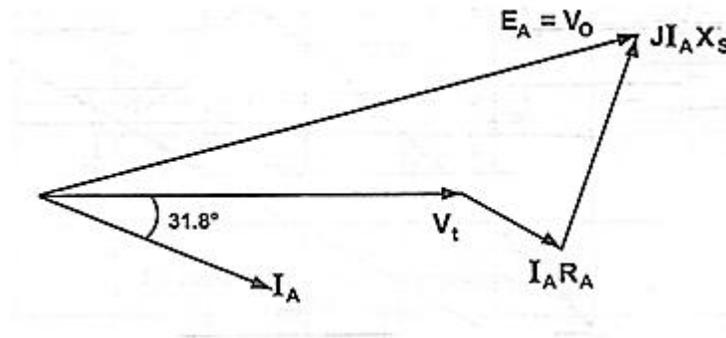
De la curva de vacío y cortocircuito (ver tabla anterior) la impedancia síncrona no saturada.

$$Z_{S(\text{no saturada})} = \frac{7.8/\sqrt{3}}{4.6} = 0.979 \Omega/\text{fase}$$

b) La impedancia síncrona saturada:

$$Z_{S(\text{saturada})} = \frac{13.5/\sqrt{3}}{9.2} = 0.847 \Omega$$

c) $\theta = \cos^{-1}0.85 = 31.8^\circ$



$$E_A = V_0 = \frac{12.6 \times 10^3}{\sqrt{3}} + (8086)(1.535 \times 10^{-3})\angle -31.8^\circ + (8086)(0.979)\angle 58.2^\circ$$

$$E_A = V_0 = 13281\angle 30.4^\circ \text{ volts}$$

La regulación de voltaje:

$$\text{Regulación de voltaje} = \frac{13281 - 7275}{7275} \times 100 = 82.6\%$$

Ejemplo:

Un pequeño generador síncrono de rotor cilíndrico está conectado en estrella y es de 10 kVA, 230 V, tiene una reactancia síncrona de $1.2 \Omega/\text{fase}$ y una resistencia de armadura de $0.5 \Omega/\text{fase}$. Calcular el porcentaje de regulación a plena carga y factor de potencia 0.8 atrasado.

Máquinas eléctricas.

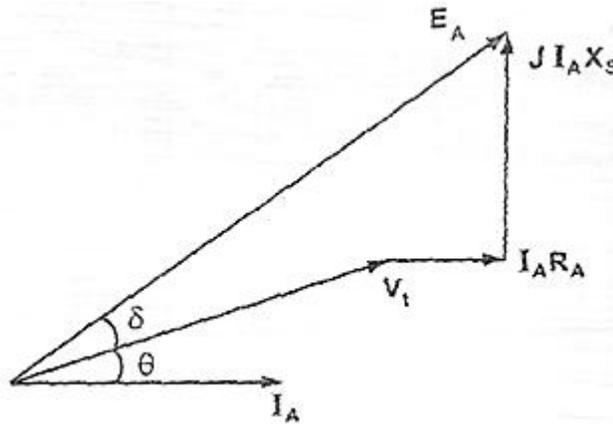
El voltaje en terminales es:

$$V_t = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132.8 \text{ V}$$

La corriente de armadura.

$$I_a = \frac{(10 \times 10^3)/3}{230/\sqrt{3}} = 25.1 \text{ A}$$

El voltaje de armadura es:



$$E_A = \sqrt{(V_t \cos \theta + I_A R_A)^2 + (V_t \operatorname{sen} \theta + I_A X_S)^2}$$

$$E_A \sqrt{(106.24 + 12.55)^2 + (79.68 + 30.12)^2} = 161.76 \text{ V}$$

La regulación de voltaje:

$$\text{Regulación de voltaje} = \frac{E_A - V_t}{V_t} \times 100 = \frac{161.76 - 132.8}{132.8} \times 100 = 21.8\%$$

Ejemplo:

Calcular la regulación de voltaje usando el método de la impedancia síncrona no saturada, para un generador de 50 MVA, 13.8 kV, 60 ciclos/seg, conexión estrella, cuando opera a plena carga con factor de potencia 0.8 atrasado, la curva característica se indica a continuación:

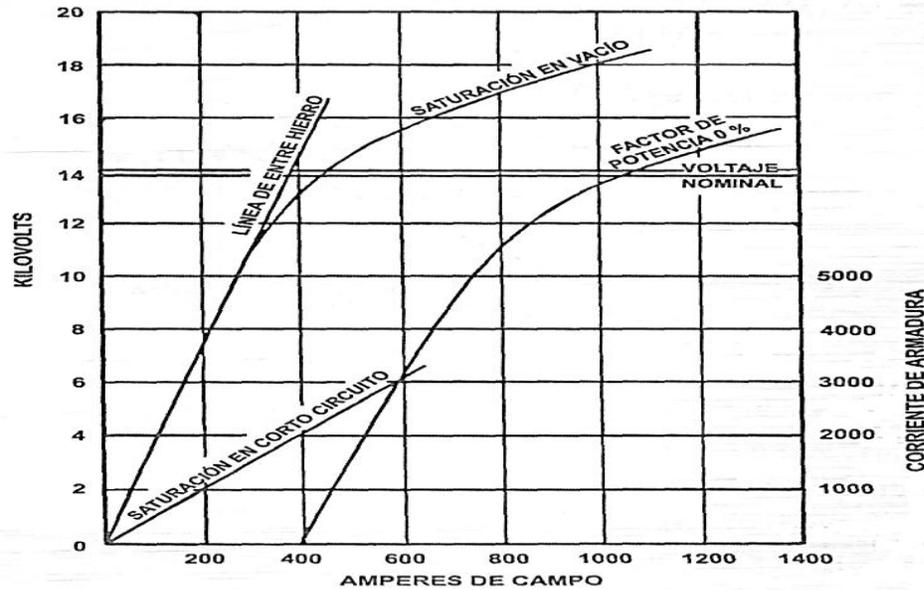


Figura 6.1.41. Curvas características para un generador trifásico de 50,000 kVA, 60 Hz, 13,800, conexión Y.

La corriente nominal o a plena carga del generador es:

$$I_A = \frac{50000}{\sqrt{3} \times 13800} = 2090 \text{ amperes}$$

De la curva de cortocircuito anterior, para producir una corriente de armadura de 2090 A, se requiere una corriente de campo de $I_t = 405 \text{ A}$. De la curva de vacío, con una corriente de campo de 405 A, se produce un voltaje terminal de vacío de 13100 volts.

De lo anterior:

$$Z_{S(\text{no saturada})} = \frac{13100}{\sqrt{3} \times 2090} = 3.62 \Omega/\text{fase}$$

Despreciando la resistencia de armadura por ser muy pequeña en comparación de la reactancia síncrona:

$$X_{S \text{ no saturada}} = 3.62 \Omega$$

La caída de voltaje: $j I_A X_S = 2090 \times 3.62 = j 7566 \text{ volts}$.

El voltaje en vacío para la carga con $\cos \theta = 0.8 \text{ atrasado}$:

$$E_A = \frac{13800}{\sqrt{3}} (0.80 + j0.6) + j7566. \quad E_A = 6374 + j12346 = 13894 \text{ volts}$$

La regulación en por ciento:

$$\text{Regulación de voltaje} = \frac{E_A - V_t}{V_t} \times 100 = \frac{13894 - 7977}{7977} \times 100 = 74.17\%$$

Máquinas eléctricas.

La potencia desarrollada:

En los dispositivos de conversión electromecánica (y los generadores síncronos no son la excepción) la expresión para la potencia desarrollada es importante, se debe hacer énfasis en que sea está convirtiendo la potencia mecánica de entrada al generador, proporcionada por el primotor o turbina, se convierte en potencia eléctrica de salida del generador. La potencia desarrollada a partir del par desarrollado T se puede calcular a partir de la expresión:

$$Pd = \omega T \text{ Watts}$$

Dónde:

$\omega = \text{velocidad mecánica de rotación en rad/seg.}$

El par:

$$T = Bl\ell r \quad N^{-m}$$

También:

$$T = \frac{EI}{\omega}$$

Con frecuencia es útil tener una ecuación que exprese esta potencia en términos de los parámetros de la máquina, por ejemplo, el voltaje y el ángulo de fase.

Para hacer esto, se puede hacer referencia a la siguiente figura, en donde se representa una máquina síncrona por su resistencia de armadura y reactancia, V_t es el voltaje terminal y E_G es el voltaje interno, ambos referidos por fase.

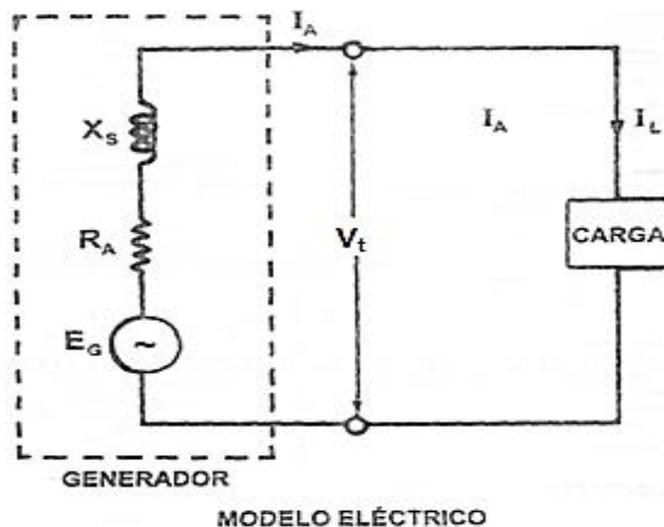


Figura. 6.1.42. Circuito equivalente de C.A. simplificado (monofásico) para un generador síncrono.

Máquinas eléctricas.

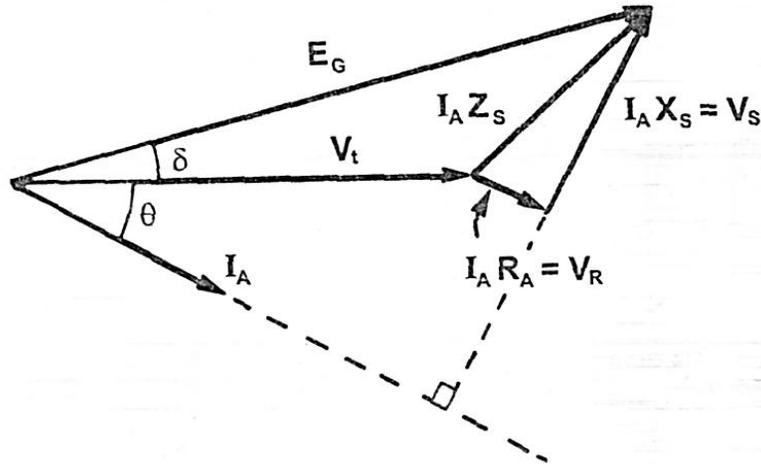


Diagrama fasorial.

Para fines del cálculo de la potencia desarrollada se puede despreciar la resistencia de armadura, ya que su efecto es muy pequeño en los generadores prácticos. Se puede escribir la expresión para la potencia desarrollada en cualquiera de las dos formas:

$$Pd = 3V_t I_A \cos \theta \text{ Watts} \quad \text{o'} \quad Pd = 3E_G I_A \cos \theta \text{ Watts}$$

Dónde:

$$\phi = \delta + \theta \text{ grados electricos}$$

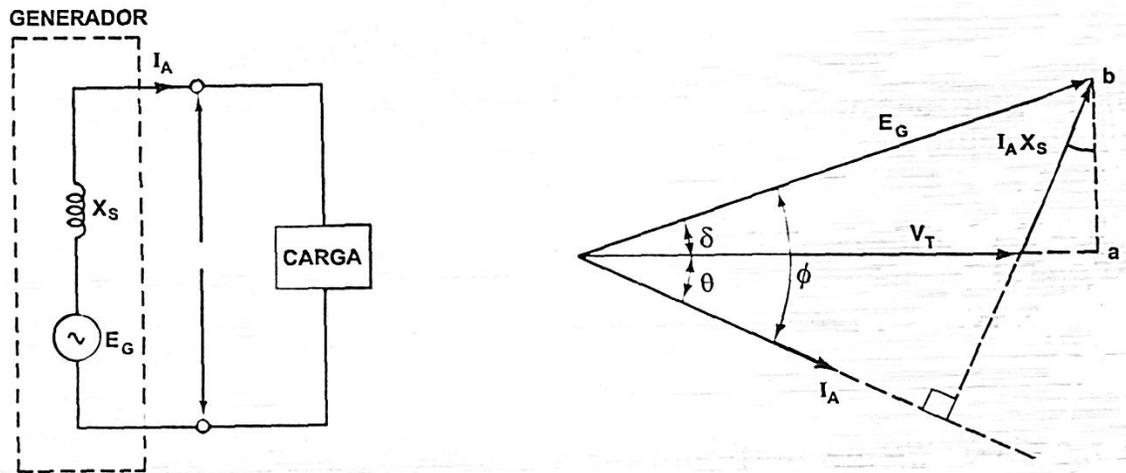
Del diagrama fasorial:

$$I_A \cos \theta = \frac{E_G}{X_S} \text{sen } \delta$$

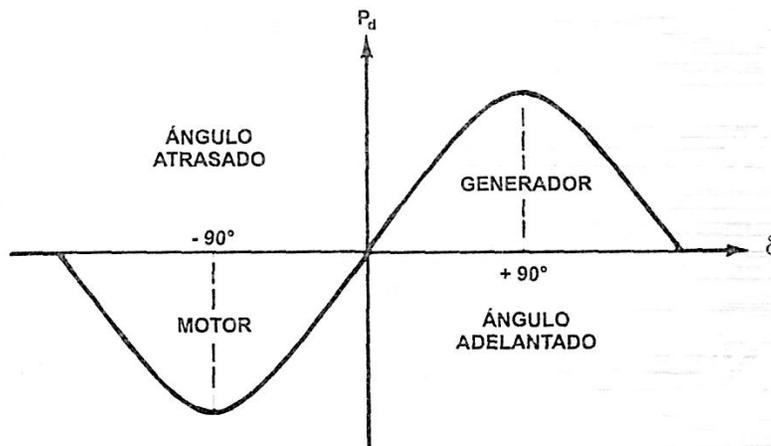
Por lo tanto, la ecuación para la potencia desarrollada se puede escribir como:

$$Pd = 3 \frac{V_t E_G}{X_S} \text{sen } \delta \text{ Watts}$$

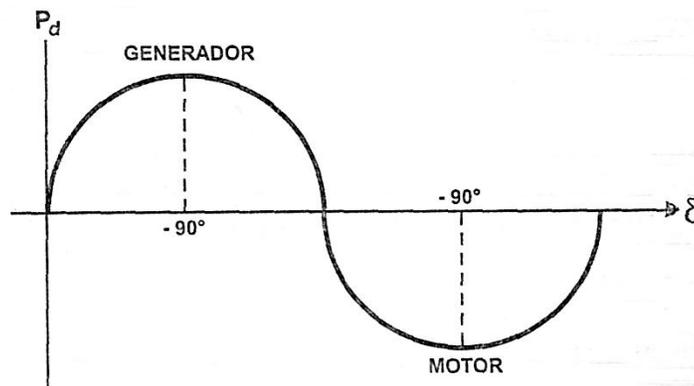
Esta ecuación solo es aplicable bajo la suposición que la resistencia R_A es despreciable, el factor 3 se refiere a las tres fases: debido a que en la ecuación anterior la potencia depende del ángulo δ , se le llama ecuación de par o potencia de ángulo.



Figuras. 6.1.43. A) Diagrama del circuito y B) Diagrama fasorial con resistencia de armadura depreciada.



Representación gráfica de P_d vs δ



Se puede observar que cuando $\delta = 0^\circ$, como son 0° , entonces no hay potencia generada. La ecuación desarrollada es senoidal.

Ejemplo:

Se tiene un generador trifásico conectado en estrella cuyos datos son: 36 MVA, 21 KV, 1800 RPM, $X_S = 9 \Omega/fase$, el voltaje de vacío o excitación de línea a neutro es $E_G = 12 kV$, el voltaje del sistema al que se conecta es de $V=17.3 kV$ (línea a línea), calcular:

- La potencia activa que desarrolla la máquina cuando el ángulo del par $\delta = 30^\circ$ (eléctricos).
- El valor pico de potencia que el generador puede entregar antes de que pierda su condición de sincronismo.

Solución:

- a) Se tiene que $E_G = 12 kV$

$$V = \frac{17.3}{\sqrt{3}} = 10 kV$$

$$\delta = 30^\circ$$

La potencia activa entregada a la red es:

$$P = \frac{E_G V}{X_S} \sin \delta = \frac{(10 \times 12)}{9} \sin 30^\circ = 6.67 MW$$

La potencia total entregada por las tres fases es:

$$P_d = 3 \times 6.67 = 20 MW$$

- b) La potencia máxima desarrollada por fase se obtiene cuando $\delta = 90^\circ$

$$P = \frac{V E_G}{X_S} \sin 90^\circ$$

$$P_d = \frac{(10 \times 12)}{9} \times 3 = 40 MW$$

La potencia pico de salida del alternador es:

$$P = 3P_d = 3 \times 13.3 = 39.9 \cong 40 MW$$

Ejemplo:

Un generador síncrono trifásico está conectado a una red de distribución de 13.8 kV para entregar potencia. La reactancia del generador es $8 \Omega/fase$, su resistencia es despreciable. La magnitud del voltaje generado es 20% mayor que el voltaje terminal. Cuando la máquina entrega 12 MW al sistema, calcular el ángulo de potencia δ al cual opera la máquina.

Solución:

El voltaje terminal es:

$$V_t = \frac{13800}{\sqrt{3}} = 7967 \text{ volts/fase.}$$

Como el voltaje generado es 20% mayor que el voltaje terminal.

$$E = 1.2 \times V_t = 1.2 \times 7967 = 9560 \text{ volts/fase.}$$

Máquinas eléctricas.

La potencia entregada por fase es: $12/3=4$ MW. De la ecuación para la potencia de ángulo:

$$P_d = \frac{E V_t}{X_s} \text{sen } \delta$$

$$4 = \frac{7.967 \times 9.56}{7} \text{sen } \delta$$

Por lo tanto:

$$\text{sen } \delta = 0.42, \quad \delta = \text{sen}^{-1}0.42 = 24.8^\circ$$

Pérdidas y eficiencia:

Para calcular la eficiencia de un generador síncrono, se sigue un procedimiento similar al seguido para la determinación de la eficiencia de los generadores de C.D., es necesario recordar que se deben establecer las pérdidas totales cuando operan bajo carga. Para los generadores esto incluye.

1. Pérdidas rotacionales por fricción y ventilación.
2. Pérdidas circulantes y por histéresis en el circuito magnético.
3. Pérdidas en el cobre, en los devanados de armadura y en las bobinas de campo.
4. Pérdidas en la carga debidas al flujo disperso, produciendo corrientes circulantes y por histéresis en la armadura circulante al fierro.

Con respecto a estas pérdidas, se pueden hacer los siguientes comentarios:

1. Las pérdidas rotacionales, que incluyen las pérdidas por fricción y ventilación son constantes, debido a que la velocidad del generador síncrono es constante. Estas pérdidas se pueden determinar de la prueba de vacío.
2. Las pérdidas en el núcleo incluyen las pérdidas por histéresis y por corrientes circulantes como resultado de los cambios en la densidad de flujo, se pueden determinar midiendo la potencia de entrada a un motor auxiliar, que se usa para accionar el generador en vacío, con y sin la excitación del campo. La diferencia en la potencia medida constituye estas pérdidas.
3. Las pérdidas en el cobre del campo y la armadura se obtienen como $R_A I_A^2$ y $V_f I_f$, debido a que se refieren como cantidades por fase. Las pérdidas en el cobre de la armadura para el generador se deben multiplicar por el número de fases. Las pérdidas en el devanado de campo son un resultado de la corriente de excitación que circulan a través de la resistencia del devanado de campo.
4. Las pérdidas de carga o pérdidas dispersas resultantes de las corrientes circulantes en los conductores de armadura incrementan las pérdidas en el núcleo debido al campo magnético distorsionado. Aun cuando es posible separar estas pérdidas por pruebas, en el cálculo de la eficiencia, se puede tomar en cuenta tomando el valor efectivo de la resistencia de armadura, en el lugar de la

resistencia de C.D. después de que todas las pérdidas se hayan determinado, la eficiencia se calcula como:

$$\eta = \frac{KVA \cos \theta}{KVA \cos \theta + (\text{pérdidas totales})} \times 100$$

Dónde:

$\eta =$ Eficiencia en por ciento.

$KVA =$ Carga en el generador.

$\cos \theta =$ Factor de potencia de la carga.

La cantidad $KVA \times \cos \theta =$ Potencia real entregada a la carga (KW) por el generador.

La ecuación anterior se puede escribir como:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \times 100 = \frac{P_{salida}}{P_{salida+perdidas}} \times 100$$

La potencia de entrada: $P_{entrada} = P_{salida+perdidas}$ es la potencia requerida por el primotor para accionar al generador con carga.

Ejemplo:

Un generador síncrono trifásico tiene resistencia en el devanado de armadura de 0.032Ω entre terminales. El devanado de campo toma 32 A de una fuente o excitatriz a 250 V, las pérdidas por fricción o ventilación son de 12.8 KW, las pérdidas en el núcleo, incluyendo las pérdidas dispersas, son de 10.6 KW. Calcular la eficiencia del generador a plena carga y factor de potencia 0.8 atrasado. Supóngase que el generador está conectado en estrella; el valor de la resistencia en C.A. se puede tomar como 1.25 veces su valor en C.D.

Solución:

La corriente de armadura:

$$I_A = \frac{KVA \times 1000}{\sqrt{3} \times V_{LL}} = \frac{2000000}{\sqrt{3} \times 2300} = 503 \text{ A}$$

$$R_{A \text{ por fase}} = \frac{0.032}{2} \times 1.25 = 0.020 \Omega$$

Pérdidas	KW
Fricción y ventilación	12.80
Pérdidas en el núcleo y dispersas	10.60
Devanado de armadura $3 \times R_A \times I_A^2 = 3 \times 0.020 \times (503)^2$	15.18
Pérdidas en el devanado de campo $\frac{(V_f \times I_f)}{1000} = \frac{250 \times 32}{1000}$	8.0
Pérdidas totales	46.58

La eficiencia:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{salida+perdidas}} \times 100$$

$$\eta = \frac{2000 \times 0.80}{2000 \times 0.8 + 46.58} \times 100 = 97.2\%$$

La reactancia transitoria:

Cuando un generador síncrono está conectado a un sistema, está sujeto a cambios de carga impredecibles que algunas veces ocurren en forma muy rápida, en tales casos, el circuito equivalente simple de una fuente de voltaje en serie con una reactancia síncrona (X_S), ya que este circuito solo es válido bajo condiciones de estado estable, o bien cuando los cambios de carga se dan en forma gradual.

Para cambios bruscos en la corriente de carga, la reactancia síncrona X_S se debe reemplazar por otra reactancia X' , cuyo valor varía como una función del tiempo.

En la figura siguiente, se muestra como varía X' cuando un generador se pone súbitamente en cortocircuito. Antes del cortocircuito, la reactancia es simplemente X_S , pero en el instante del cortocircuito, la reactancia decae a un valor mucho menor $X'd$, después se incrementa gradualmente hasta que llega a ser nuevamente X_S después de un cierto intervalo de tiempo T , la duración del intervalo depende del tamaño del generador, para maquinas debajo de 100 KVA son solo las ultimas fracciones de segundo, pero para maquinas en el rango de 1000 MVA, puede ser tan grande como 10 segundos.

El valor mínimo de reactancia $X'd$ se le conoce como reactancia transitoria del generador y puede ser tan baja como el 15% del valor de la reactancia síncrona, en consecuencia, el valor inicial de la corriente de cortocircuito es mucho mayor que la correspondiente a la reactancia síncrona X_S .

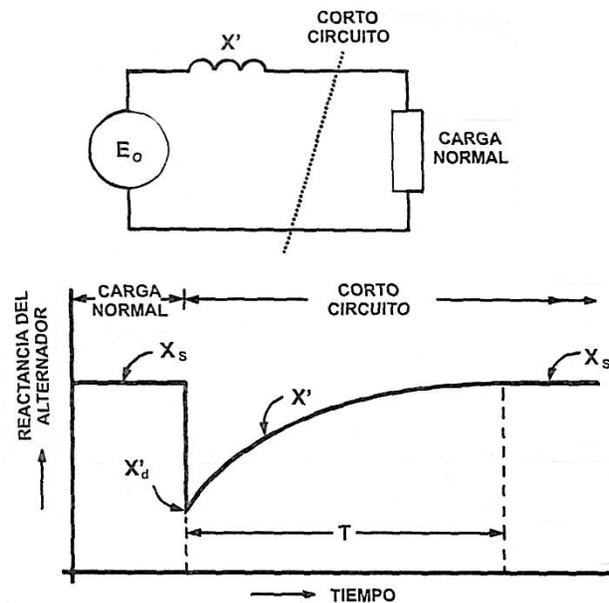


Figura. 6.1.44. Variación de la reactancia de un generador siguiendo a un corto circuito.

Sincronización de un generador:

En la práctica, es muy frecuente conectar dos o más generadores en paralelo para alimentar una carga. Por ejemplo, como los requerimientos de potencia de una empresa suministradora de energía eléctrica van creciendo durante el día, se van conectando generadores en forma sucesiva al sistema para proporcionar potencia extra.

Después, cuando la demanda de potencia cae o se reduce, algunos generadores que están previamente seleccionados, se desconectan en forma temporal del sistema, hasta que la potencia o demanda aumente y entonces tengan que ser conectados a la red.

Los generadores síncronos son entonces, en forma regular, conectados y desconectados del sistema como una respuesta a la demanda de los clientes o usuarios del servicio de energía eléctrica. Estos generadores se conectan en paralelo, pero respetando ciertos aspectos mínimos como son: que ni el voltaje, ni la frecuencia del sistema pueden ser alterados. Antes de conectar un generador a la red eléctrica, o bien conectar con otro generador en paralelo, se deben satisfacer las siguientes condiciones:

1. La frecuencia del generador debe ser igual a la frecuencia del sistema o a la del otro generador que se conecta en paralelo.
2. El voltaje del generador debe ser igual al voltaje del sistema o del otro generador al que se va a conectar en paralelo.
3. El voltaje del generador debe estar en fase con el voltaje del sistema.
4. La secuencia de fase del generador debe ser la misma que la del sistema.

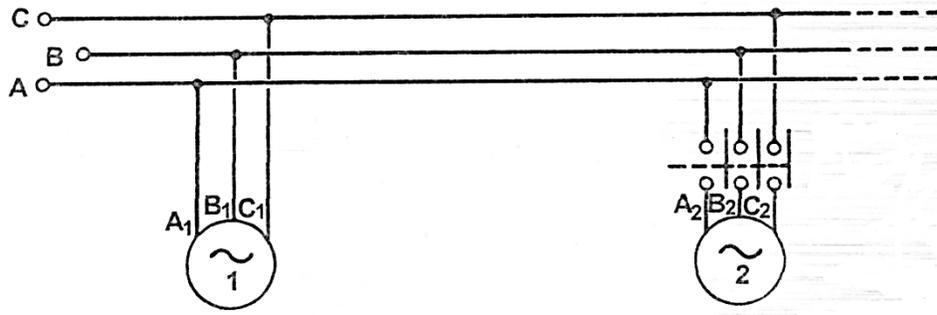


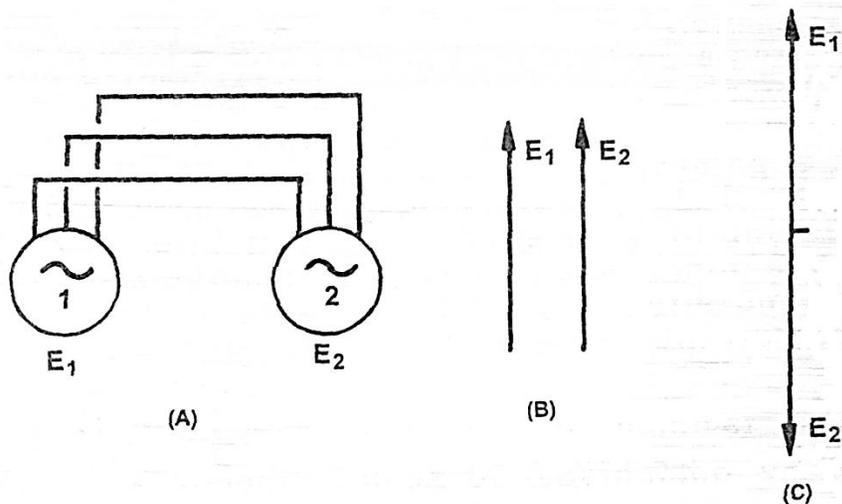
Figura. 6.1.45. Operación en paralelo de generadores.

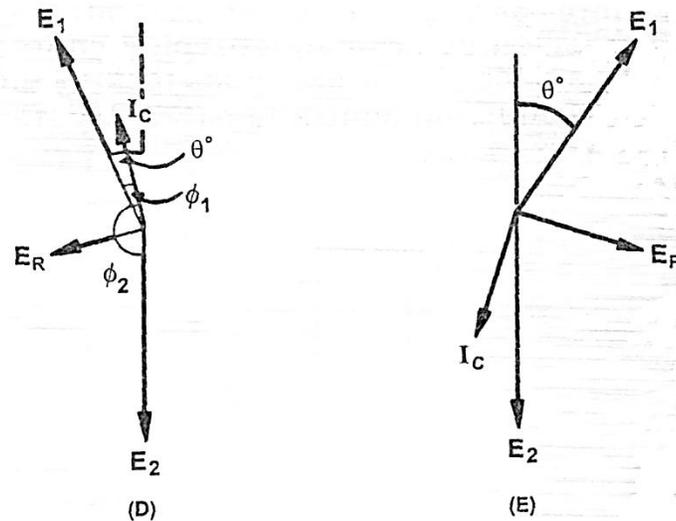
El efecto del cambio de velocidad.

Cuando dos o más máquinas se han conectado en paralelo, deben permanecer en operación estable bajo cualquier condición de operación normal, esto es, voltajes, frecuencia, velocidad e igualdad de fase. En el caso de dos máquinas, se muestra la figura (A) y el diagrama fasorial en el instante de la conexión es (B). En la figura (C), se muestra un diagrama fasorial que es válido también, ya que E_1 y E_2 están en fase en el tiempo para conectar las máquinas en paralelo con respecto al circuito local formado por las dos armaduras, E_1 que debe ser igual y opuesta a E_2 .

Si por alguna razón la máquina 1 recibe algún par mecánico extra, tendrá el intento de acelerar, E_1 avanzara en fase como se muestra en (D) cuando E_1 se ha movido adelante por θ^0 . Hay una FEM resultante existente en el circuito local formado por las dos armaduras, E_R , dado que la armadura es altamente inductiva, usando la convención para la FEMS.

$$\bar{E}_R = \bar{E}_1 - \bar{E}_2 \text{ y tambien } I_C = \frac{E_1 - E_2}{Z_1 - Z_2}$$





Figuras. 6.1.46. Efecto del incremento de la velocidad en la máquina. (A), (B) y (C) conexiones de la máquina fasoriales. (D) Aceleración de la máquina, (E) Desaceleración de la máquina 1.

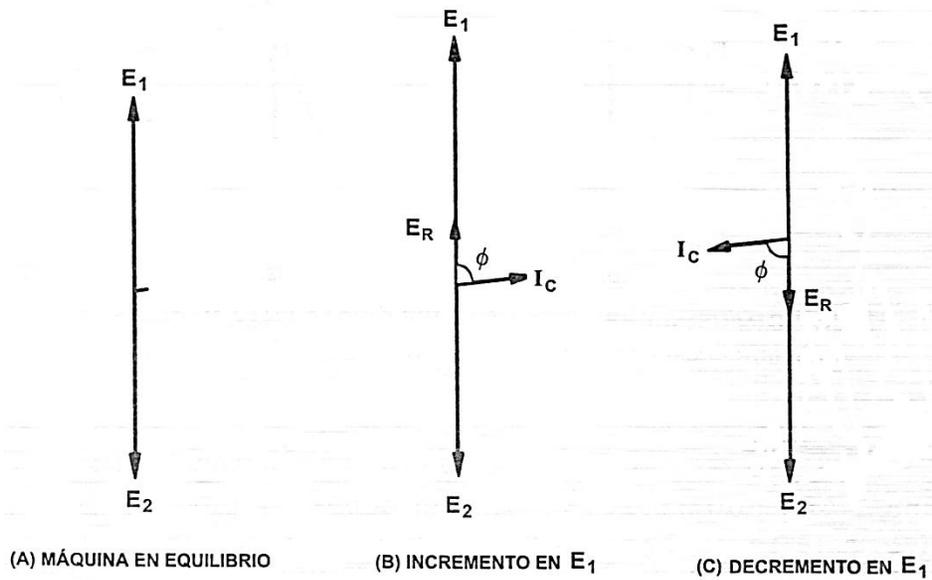
De la figura (D), la máquina 1 alimenta una potencia $E_1 I_C \cos \phi_1$ y la máquina 2 una potencia $E_2 I_C \cos \phi_2$ y $\cos \phi_1$ es positiva y $\cos \phi_2$ es negativo, esto es, la máquina 2 alimenta una potencia negativa, o en otras palabras, trata de convertirse en motor. En consecuencia, la máquina 1 tiende a reducir su velocidad y la máquina 2 para recibir potencia, tiende a acelerar. Por el contrario, si la máquina 1 se regresa o defasa como se muestra en (E), las direcciones de E_R e I_C se cambian de manera que la máquina 2 ahora genera y la máquina 1 se motoriza.

Efecto de la diferencia en las fuerzas electromotrices (FEM):

La inherente estabilidad de dos máquinas en paralelo también se extiende a cualquier cambio tendiente a alterar las FEMS individuales para estudiar el balance o equilibrio, como se hizo anteriormente, se hace uso otra vez de la representación fasorial en la figura (A) para la máquina en equilibrio, si se altera la excitación de tal manera que E_1 se incremente, entonces existe una FEM resultante, E_R es el circuito local, como se muestra en (B), y aquí otra vez la corriente circulante se atrasa 90° con respecto a E_R .

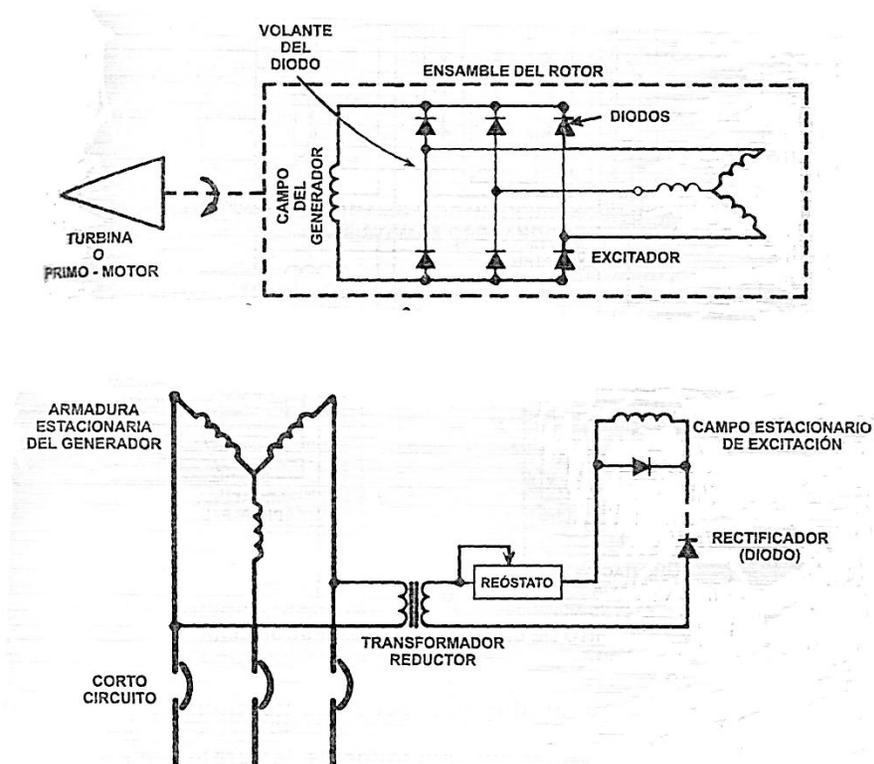
La corriente I_C también está aproximadamente atrasada 90° con respecto a E_1 y adelantada 90° con respecto a E_2 . La potencia producida es prácticamente cero, solo lo justo para alimentar las pérdidas en el cobre, pero debido a que I_C se atrasa con relación a E_1 , se produce una reacción de desmagnetización sobre la máquina 2, por lo tanto E_1 tiende a caer y E_2 a elevarse, restableciendo el equilibrio inicial otra vez. La condición contraria es verdadera para $E_2 > E_1$ como se muestra en (C).

Máquinas eléctricas.



Figuras. 6.1.47. Cambio de excitación de la máquina 1.

La sincronización se puede hacer cuando todas las condiciones en los cuatro puntos anteriores son satisfechas y se puede hacer por el método simple de las conexiones de las lámparas a través del interruptor, también se puede hacer uso de un sincronoscopio, o bien con un equipo de control de estado sólido, que sincroniza en forma automática.



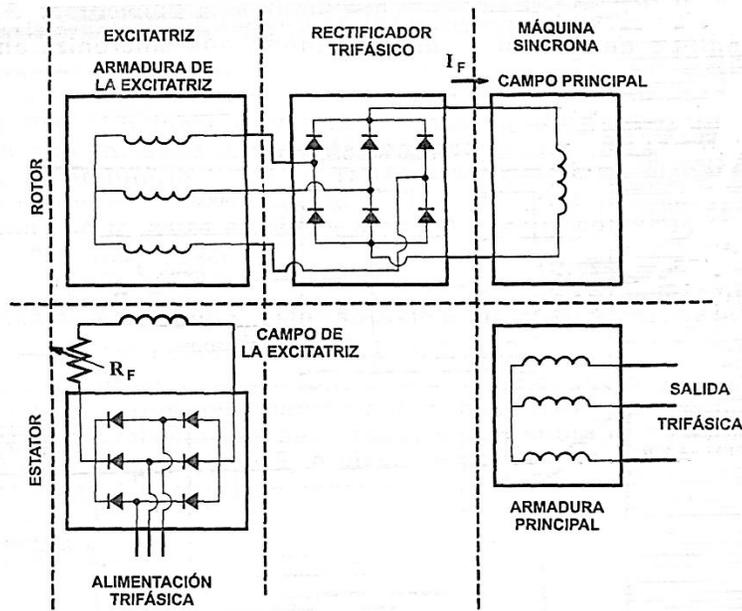


Figura. 6.1.48. Circuito de una excitatriz sin escobillas.

Para sincronizar un generador se procede como sigue:

1. Se ajusta la velocidad del regulador de la turbina, de manera que la frecuencia del generador este cercana a la frecuencia del sistema.
2. Ajustar la excitación de manera que el voltaje del generador (E_G) sea igual al voltaje del sistema (E).
3. El ángulo de fase entre E_G y E se puede observar por medio de un sincronoscopio, que es un instrumento que tiene una aguja que indica continuamente el ángulo de fase entre los dos voltajes, cubriendo el rango total desde cero hasta 360° .
4. El interruptor de línea se cierra conectando de esta manera el generador al sistema. El esquema básico de sincronización por el método de las tres lámparas.

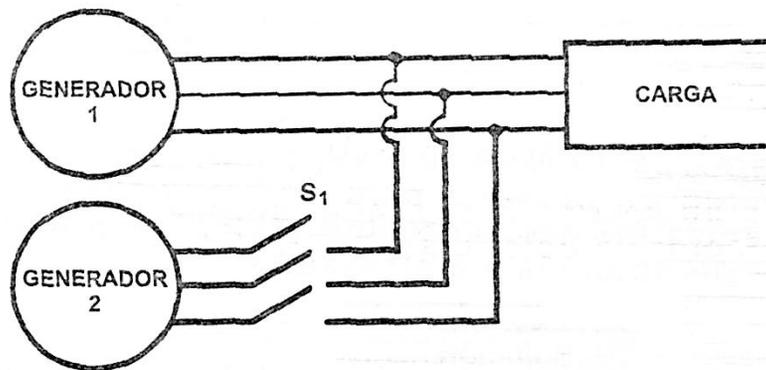


Figura. 6.1.49. Conexión en paralelo de un generador con sus sistemas operando.

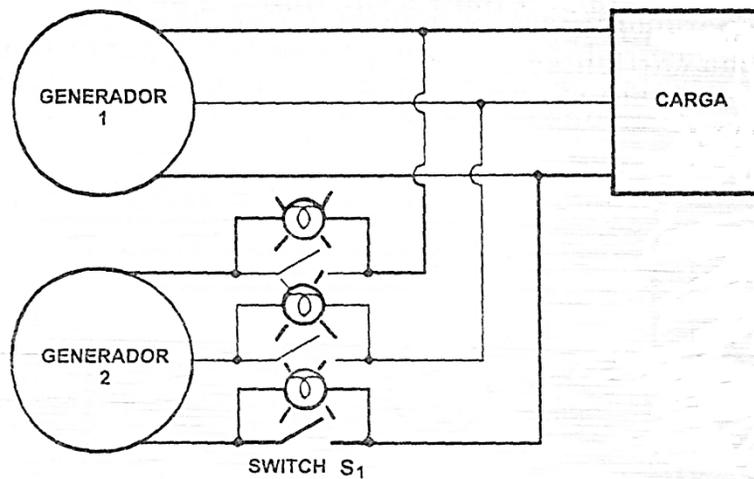
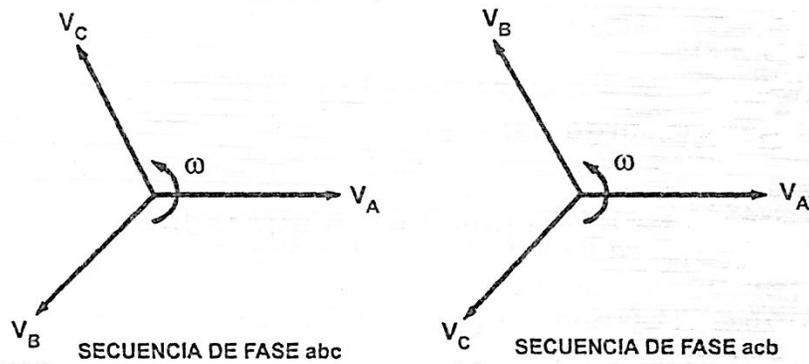


Figura. 6.1.50. Método de las tres lámparas para sincronización.

Ejemplo:

Se tienen dos generadores de 10 MVA, 6.6 kV, trifásicos en conexión estrella, 60 HZ. Que operan en paralelo para alimentar una carga de 18 MVA a factor de potencia 0.8 atrasado, una de las maquinas opera a plena carga con factor de potencia 0.8 atrasado.

Solución:

La corriente a plena carga para el generador de 10 MVA.

$$I = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 6.6 \times 10^3} = 875 \text{ A}$$

La corriente total de carga es:

$$I_{CARGA} = \frac{18 \times 10^6}{\sqrt{6.6}} = 1575 \text{ A a } \cos \theta = 0.6 \text{ atrasado}$$

$$\theta = \cos^{-1} 0.6 = 45.6^\circ$$

Máquinas eléctricas.

La condición de operación para la máquina 2 se puede encontrar por una simple relación fasorial, como se indica en la siguiente figura, aquí se muestran las corrientes de línea debido a que estas son iguales a la corriente de fase para la conexión estrella.

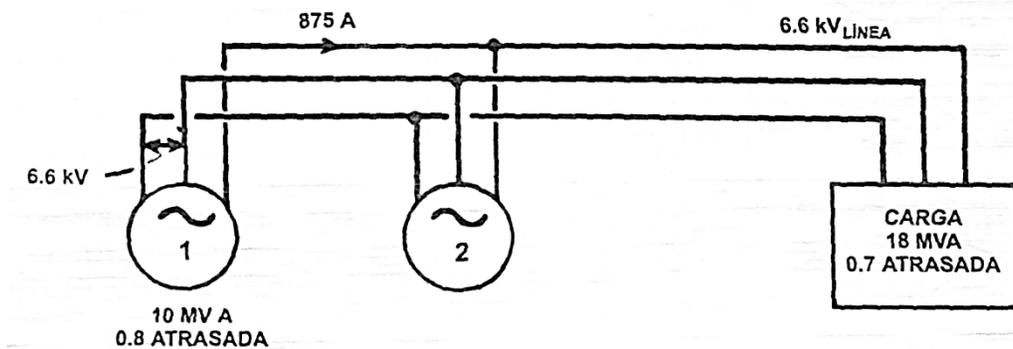


Figura. 6.1.51.

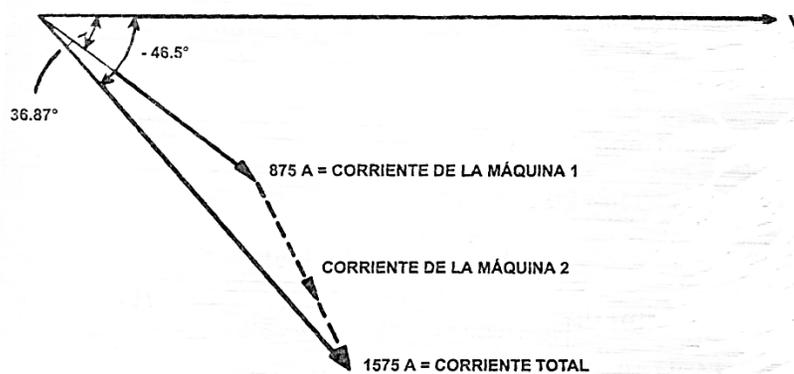


Figura. 6.1.52. Cálculos de referencia.

La forma de solución mostrada en el diagrama fasorial anterior es irrelevante, el valor de la corriente de la máquina 2 se puede determinar dibujando por relaciones trigonométricas o por el uso de los números complejos. Un dibujo a escala es la forma más fácil, con resultados dentro de límites muy aproximados; sin embargo, el uso de números complejos es la forma preferente de solución.

$$I_1 = 875 \angle -36.9^\circ$$

$$I_T = 1575 \angle -45.6^\circ$$

Y como:

$$I_2 = I_T - I_1$$

$$I_2 = 1575 \angle -45.6^\circ - 875 \angle -36.9^\circ$$

$$I_2 = 722.3 \angle -56.2^\circ \text{ A}$$

Máquinas eléctricas.

Es decir, la máquina 2 entrega 772 A, a factor de potencia 0.556 atrasado, con lo cual la potencia entregada es:

$$P_2 = \sqrt{2} \times 6.6 \times 10^3 \times 722 \times 0.556 \times 10^6 = 4.589 \text{ MW}$$

La máquina 1 entrega:

$$P_1 = \sqrt{3} \times 6.6 \times 10^3 \times 875 \times 0.8 \times 10^6 = 8.00 \text{ MW}$$

Es decir, la carga total:

$$P_T = 4.589 + 8.0 = 12.589 \text{ MW}$$

Cada generador síncrono individual tiene ahora su propio voltaje especificado y corriente necesaria para alimentar la carga total.

Dada la impedancia síncrona es posible encontrar un valor de FEM para cada máquina bajo estas condiciones de carga, como se muestra en las siguientes figuras:

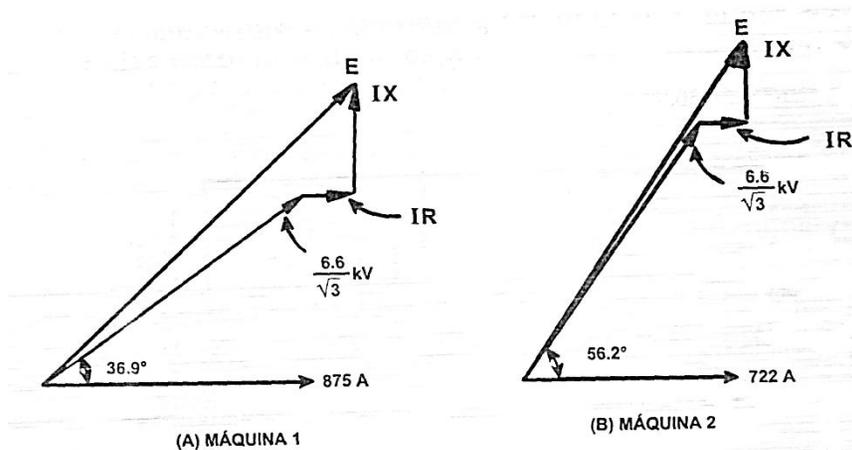


Figura. 6.1.53. Diagramas fasoriales.

Para la máquina 1 (figura A), la componente horizontal de E_1 está dada por:

$$\frac{6.6 \times 10^3}{\sqrt{3}} = \cos 36.9^\circ + 875 \times 0.13; \quad [R_A = 0.13 \Omega/fase] = 3161 \text{ V}$$

La componente vertical de E_1 por:

$$\frac{6.6 \times 10^3}{\sqrt{3}} = \sin 36.9^\circ + 875 \times 4.02; \quad [X_S = 4.02 \Omega/fase] = 5805 \text{ V}$$

Por lo tanto:

$$E_1 = \sqrt{(3161)^2 + (5805)^2} = 6610 \text{ V/fase}$$

$$E_1 = \sqrt{3} \times 6610 = 11.45 \text{ kV}_{Linea}$$

Máquinas eléctricas.

E_1 se adelanta a I_1 por 61.4° o E_1 esta adelantado por $61.4^\circ - 36.9^\circ = 24.5^\circ$ un cálculo similar para la máquina 2 muestra que:

$$E_2 = 6460 \text{ volts/Fase}$$

$$E_2 = \sqrt{3} \times 6460 = 11.19 \text{ kV}_{\text{Linea}}$$

Con E_2 delante de V por 13.8° , el comportamiento completo se muestra en la siguiente figura:

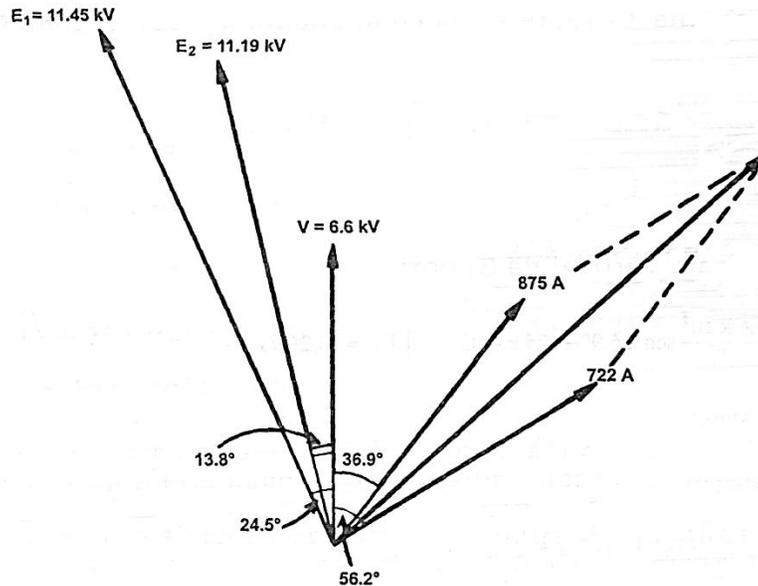


Figura. 6.1.54. Patrones comparativos de operación para las dos máquinas.

Ejemplo:

Se tienen dos generadores de 3000 KW, 6.6 kV, conectados en estrella, alimentando una carga a factor de potencia 0.8 atrasado. La impedancia síncrona de la máquina A es $Z_A = 0.5 + j10 \Omega/\text{Fase}$ y para la máquina B $Z_B = 0.4 + j12 \Omega/\text{Fase}$. La excitación de la máquina A se ajusta de manera que entrega 150 A a factor de potencia atrasado y el gobernador se ajusta de manera que la carga se comparte por igual entre máquinas. Calcular la corriente, factor de potencia, FEM inducida y ángulo de carga de cada máquina.

Solución:

Para la máquina A:

$$\cos \theta_A = \frac{1500}{\sqrt{3} \times 6.6 \times 150} = 0.874$$

$$\theta_A = \cos^{-1} 0.874 = 29^\circ$$

$$\text{sen} \theta_A = \text{sen } 29^\circ = 0.485$$

Máquinas eléctricas.

La corriente total para la carga de 3000 MW a factor de potencia 0.8 atrasado es:

$$I_T = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 6.6 \times 0.8} = 328(0.8 - j0.6)$$

$$I_T = 262.4 - j196.8$$

$$I_A = 150(0.874 - j0.485) = 131.1 - j72.75$$

La corriente en el generador B:

$$I_B = I_T - I_A = (262.4 - j196.8) - (131.1 - j72.75)$$

$$I_B = 131.3 - j124.05$$

$$I_B = \sqrt{(131.3)^2 + (124.05)^2} = 181 \text{ A}$$

$$\cos \theta_B = \frac{131.3}{181} = 0.723 \text{ atrasado}$$

Tomando el voltaje V como referencia y trabajando en valores de fase:

$$\bar{E}_A = \bar{V} + \bar{I}_A \bar{Z}_A = (6.6/\sqrt{3}) + (131.1 - j72.75)(0.5 + j10) \times 10^{-3} = 4.6 + j1.27 \text{ kV}$$

El ángulo de carga δ_A :

$$\delta_A = \tan^{-1} \frac{1.27}{4.6} = 15.4^\circ$$

El valor de la FEM:

$$= \sqrt{3} \times \sqrt{(4.6)^2 + (1.27)^2} = 8.26 \text{ kV}$$

$$\bar{A}_B = \bar{V} + \bar{I}_B \bar{Z}_B = (6.6/\sqrt{3}) + (131.3 - j124.05)(0.4 + j12) \times 10^{-3} = 5.35 + j1.52 \text{ kV}$$

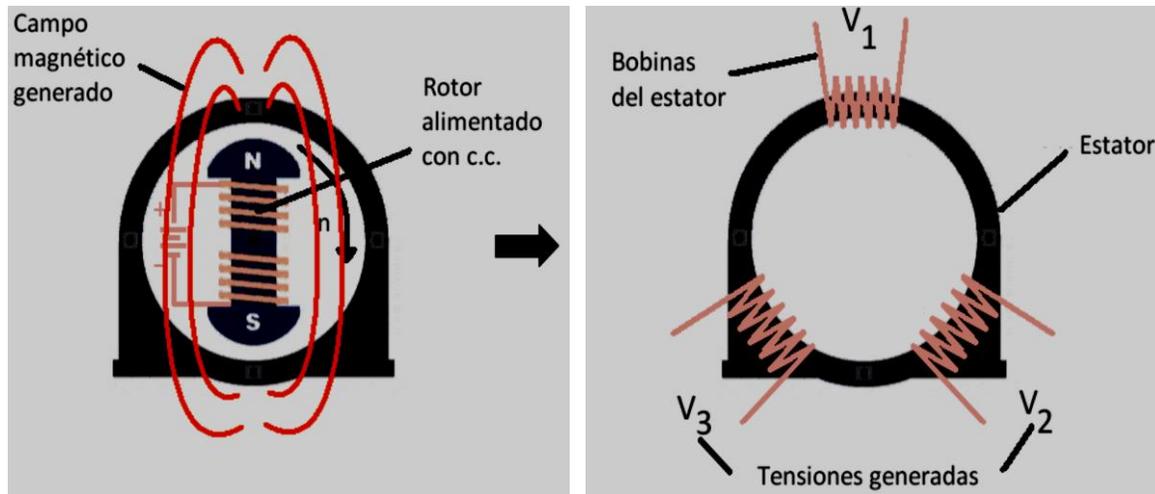
El ángulo de carga:

$$\delta_B = \tan^{-1} \frac{1.52}{5.35} = 15.9^\circ$$

El valor del voltaje de línea = 9.6 kV.

6.2. Funcionamiento:

A un generador síncrono se le aplica corriente continua en el devanado del rotor y este crea un campo magnético, luego mediante un motor se hace girar el rotor y se genera un campo magnético giratorio en la máquina, este campo magnético induce 3 F.E.M's en las bobinas del estator desfasadas 120° entre si y de igual magnitud.



Figuras. 6.2.1.

El funcionamiento del generador de corriente alterna, se basa en el principio general de inducción de voltaje en un conductor en movimiento cuando atraviesa un campo magnético. Este generador consta de dos partes fundamentales, el inductor, que es el que crea el campo magnético y el inducido que es el conductor el cual es atravesado por las líneas de fuerza de dicho campo. Los mismos funcionan colocando una espira dentro de un campo magnético y se la hace girar, sus dos lados cortarán las líneas de fuerzas del campo, induciéndose una fem, esta verificada en los extremos del conductor que forma la espira. La fem inducida es de carácter alternado. Cerrando el circuito esta fem da origen a una corriente eléctrica, también alternada. Si conectamos una lámpara al generador veremos que por el filamento de la bombilla circula una corriente que hace que se ponga incandescente, y emite tanta más luz cuanto mayor sea la velocidad con que gira la espira en el campo magnético.

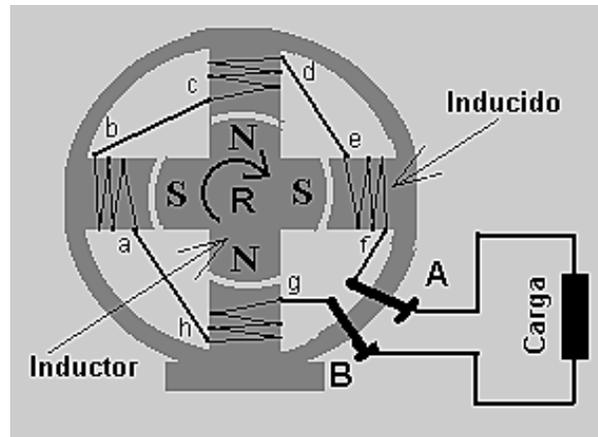


Figura. 6.2.2.

El inductor está constituido por el rotor R, dotado de cuatro piezas magnéticas, las que para simplificar son imanes permanentes, cuya polaridad se indica, y el inducido o estator con bobinas de alambre arrolladas en las zapatas polares.

Las cuatro bobinas a-b, c-d, e-f y g-h, arrolladas sobre piezas de una aleación ferromagnética, se magnetizan bajo la acción de los imanes del inductor. Dado que el inductor está girando, el campo magnético que actúa sobre las cuatro zapatas cambia de sentido cuando el rotor gira 90° (se cambia de polo N a polo S), y su intensidad pasa de un máximo, cuando están las piezas enfrentadas, a un mínimo cuando los polos N y S están equidistantes de las piezas de hierro.

Son estas variaciones de sentido y de intensidad del campo magnético las que inducirán en las cuatro bobinas una diferencia de potencial (voltaje) que cambia de valor y de polaridad siguiendo el ritmo del campo.

La frecuencia de la corriente alterna que aparece entre los terminales A-B se obtiene multiplicando el número de vueltas por segundo del inductor por el número de pares de polos del inducido (en este caso 2), y el voltaje generado dependerá de la fuerza de los imanes (intensidad del campo), la cantidad de vueltas de alambre de las bobinas y de la velocidad de rotación.

La corriente que se genera mediante los alternadores descritos, aumenta hasta un pico, cae hasta cero, desciende hasta un pico negativo y sube otra vez a cero varias veces por segundo, dependiendo de la frecuencia para la que esté diseñada la máquina. Este tipo de corriente se conoce como corriente alterna monofásica. Sin embargo, si la armadura la componen dos bobinas, montadas a 90° una de otra, y con conexiones externas separadas, se producirán dos ondas de corriente, una de las cuales estará en su máximo cuando la otra sea cero. Este tipo de corriente se denomina corriente alterna bifásica. Si se agrupan tres bobinas de armadura en ángulos de 120° , se producirá corriente en forma de onda triple, conocida como corriente alterna trifásica.

Máquinas eléctricas.

Siendo lo mismo girar la espira o a los campos, será mejor girar aquella parte que conduzca menor corriente porque los contactos deslizantes deberán dejar paso a corrientes más pequeñas. Esto se hace con los alternadores y motores reversibles.

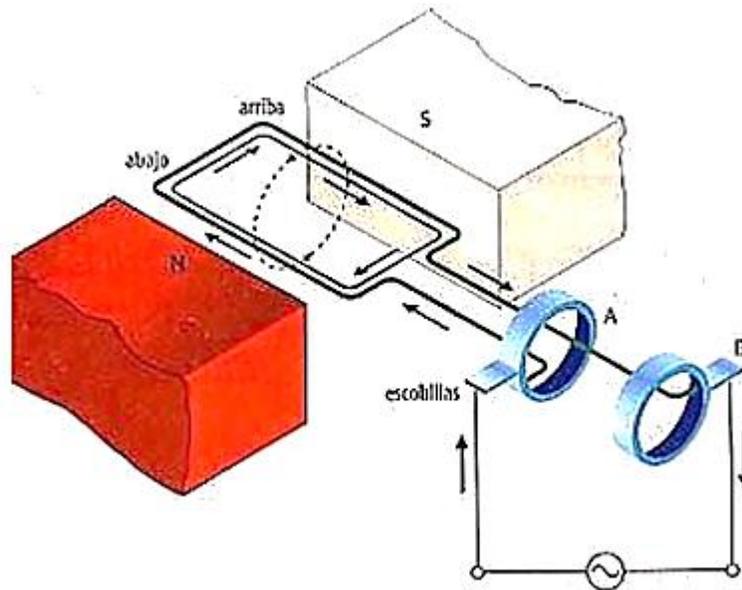


Figura. 6.2.3.

Como la fem es proporcional a las variaciones del flujo magnético y al número de espiras estos alternadores suelen llevar una bobina con muchas espiras.

La ley de Faraday se utiliza para obtener la fem y la ley de Lenz para determinar el sentido de la corriente inducida.

6.3. Circuito equivalente:

El voltaje E_A es el voltaje interno generado, en una fase del generador síncrono. Sin embargo, este voltaje E_A no es usualmente el voltaje que aparece en los terminales del generador. En efecto, la única vez en la cual el voltaje interno E_A es el mismo voltaje de salida V_ϕ de una fase es cuando no fluye corriente de armadura en la máquina.

Existen varios factores que ocasionan la diferencia entre E_A y V_ϕ y estos son:

1. La distorsión del campo magnético del entrehierro debida a la corriente que fluye en el estator, llamada reacción de inducido.
2. La autoinductancia de las bobinas de la armadura.
3. La resistencia de las bobinas de la armadura.
4. El efecto de la forma de los polos salientes del rotor.

Máquinas eléctricas.

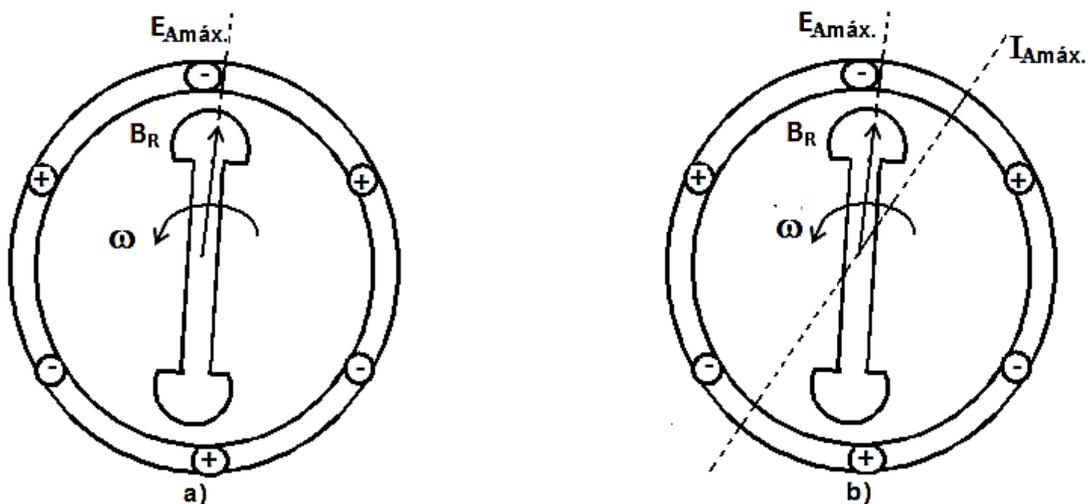
Se estudiarán los efectos de los tres primeros factores y se desarrollará un modelo de la máquina a partir de ellos. En este capítulo se ignoran los efectos de la forma de los polos salientes en la operación de la máquina síncrona; en otras palabras, en este capítulo se supondrá que todas las máquinas tienen rotores cilíndricos o de polos no salientes. Partiendo de estos supuestos, las respuestas que se obtengan serán un poco inexactas si la máquina tiene polos salientes, pero los errores serán relativamente mínimos.

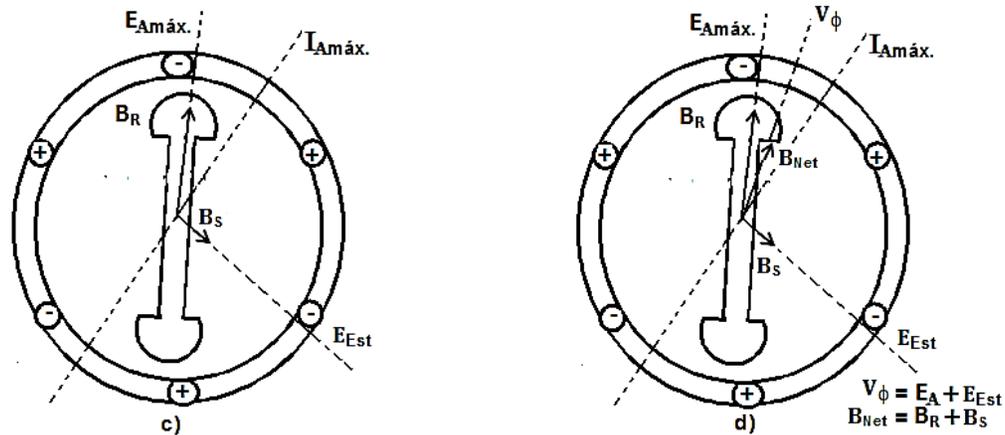
REACCION DE INDUCIDO:

El primer efecto mencionado y normalmente el mayor de ellos es la reacción de inducido cuando gira el rotor de un generador, se mide un voltaje E_A en las bobinas estatoricas del mismo. Si se conecta una carga a los terminales del generador, fluye una corriente, pero el flujo de corriente trifásica estatorica produce un campo magnético propio en la máquina. Este campo magnético estatorico distorsiona el campo magnético del rotor cambiando el voltaje de fase resultante. Este efecto se llama reacción de inducido debido a que la corriente del inducido (estator) afecta al campo magnético que la produce en primera instancia.

Este campo magnético giratorio se produce por la circulación de corriente alterna en las bobinas del estator (Φ_{Est}), que deben estar desfasadas 120° , para que se produzca el efecto del teorema de Ferrari – Tesla, al distorsionarse el Φ_{Rot} , el Φ_{Neto} , disminuye, por lo que se debe aumentar la I_{exc} para aumentar el Φ_{Rot} y mantener la tensión en bornes constante.

Gráficamente:





Figuras. 6.3.1. a), b), c) y d).

Desarrollo de un modelo para la reacción de inducido:

- a) Un campo magnético rotacional produce el voltaje interno generado E_A .
- b) El voltaje resultante produce un flujo de corriente en atraso se conecta a una carga con factor de potencia en atraso.
- c) La corriente del estator produce su propio campo magnético B_S , que produce su propio voltaje E_{Est} en los devanados del estator de la máquina.
- d) El campo magnético B_S se suma a B_R y se transforma en B_{Net} . El voltaje E_{Est} se suma a E_A y produce V_ϕ en la salida de la fase.

En la figura a) se muestra un rotor que está girando en el interior del estator trifásico, al cual no se ha conectado carga, lo que quiere decir que no circula corriente por las bobinas del estator, como no hay circulación de corriente no se genera ningún campo magnético, solo está el campo magnético producido por el rotor. Se debe aclarar que si se genera un voltaje V_ϕ en los bornes, que será el mismo que el voltaje generado interno E_A .

Suponiendo que se conecta carga a los bornes del generador, dependiendo de esta carga la corriente se atrasará (carga inductiva) figura b), se adelantará (carga capacitiva) o estará en fase (carga resistiva).

Ahora la corriente al circular por el arrollamiento del estator, (suponiendo que están conectadas las 3 fases, aunque ahora el análisis es para una fase) inducirá un campo magnético B_S que se superpondrá al campo magnético inducido por el rotor B_R , el sentido de este campo se determina por la regla de la mano derecha, figura c) este campo B_S induce la tensión E_{Est} en el mismo estator.

Con dos voltajes presentes en los devanados estatóricos. El voltaje total de una fase es la suma del voltaje interno generado E_A y el voltaje de reacción de inducido E_{Est} :

$$V_\phi = E_A + E_{Est}$$

Máquinas eléctricas.

El campo magnético B_{Net} es simplemente la suma de los campos magnéticos del rotor y el estator:

$$B_{Net} = B_R + B_S$$

Debido a que los ángulos de E_A y B_R son iguales y los ángulos de E_{Est} y B_S también son iguales, el campo magnético resultante B_{Net} coincidirá con el voltaje neto V_Φ . Nótese que el voltaje E_{Est} está un ángulo de 90° atrás del plano de la corriente máxima I_A , el voltaje E_{Est} es directamente proporcional a la corriente I_A . Si X es una constante de proporcionalidad, el voltaje de reacción de inducido puede expresarse como:

$$E_{Est} = -jXI_A$$

Por lo tanto el voltaje de una fase es:

$$V_\Phi = E_A - jXI_A$$

La ecuación de la ley de voltajes de Kirchoff para el siguiente circuito es:

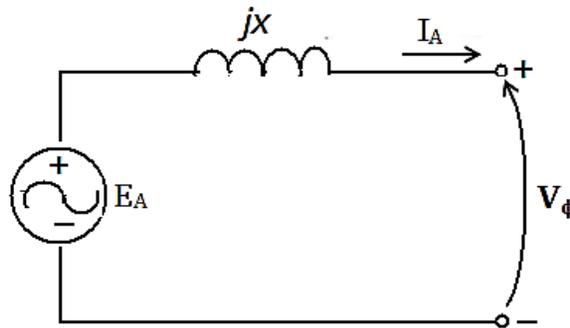


Figura. 6.3.2.

Esta es exactamente la misma ecuación que la que describe el voltaje de reacción del inducido. Por lo tanto, se puede modelar el voltaje de reacción de inducido como inductor en serie con un voltaje interno generado.

Además los efectos de la reacción del inducido, los devanados de estator tienen una autoinductancia y una resistencia. Si llamamos L_A autoinductancia del estator (y se llama X_A a su reactancia correspondiente), mientras que la resistencia del estator es llamada R_A , la diferencia total entre E_A y V_Φ está dada por:

$$V_\Phi = E_A - jXI_A - jX_A I_A - R_A I_A$$

Los efectos de la reacción del inducido y la autoinductancia de la máquina son representados por reactancias, y es costumbre combinarlas en una sola llamada reactancia sincrónica de la máquina:

$$X_S = X + X_A$$

Además los efectos de la reacción de inducido y la autoinductancia son efectos que siempre se producirán juntos.

La reactancia sincrónica es un dato que se da en la placa de la máquina, y es característica de cada máquina.

Por lo tanto la ecuación final que describe a V_{ϕ} es:

$$V_{\phi} = E_A - jX_S I_A - R_A I_A$$

Ahora es posible esquematizar el circuito equivalente de un generador síncrono trifásico, se lo muestra en la siguiente figura:

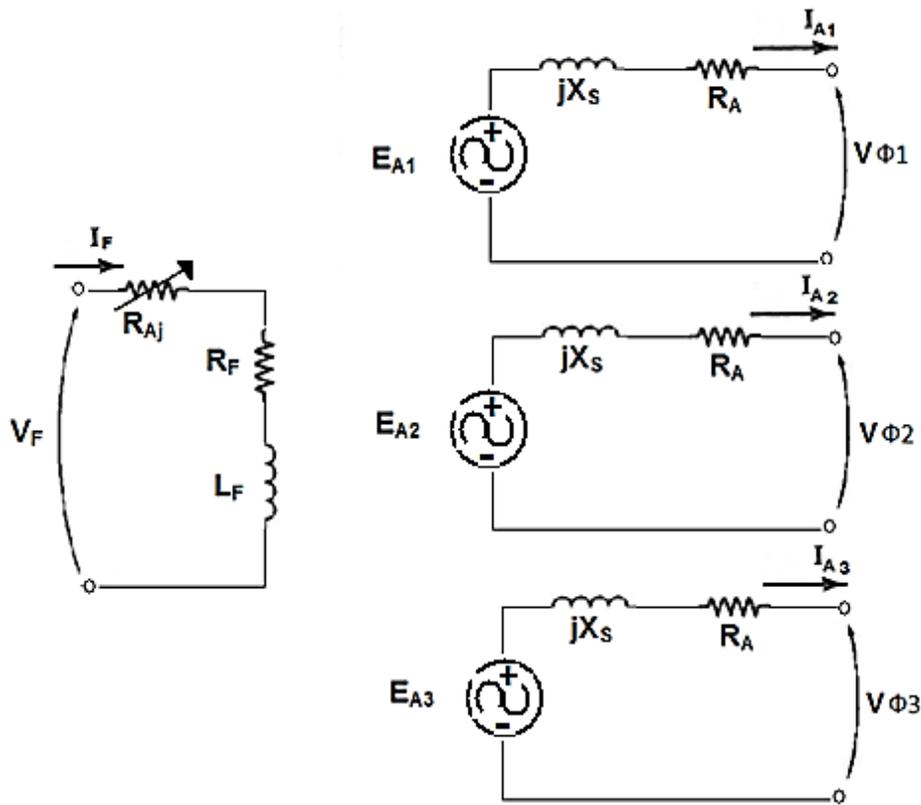


Figura. 6.3.3.

Donde aparece una fuente de potencia de c.c. alimentando el circuito de campo del rotor, modelado por la inductancia de la bobina y dos resistencias en serie, una que es fija y otra que es variable, esta última se la usa para variar la corriente de campo, según la ley de ohm $V = I \cdot R$ con $V = \text{cte.}$, donde la corriente varía inversamente a la resistencia. Los voltajes y las corrientes de las tres fases están desfasados 120° en los demás estas son idénticas.

Estas tres fases se pueden conectar bien en Y o en Δ .

Máquinas eléctricas.

Normalmente el hecho de que las tres fases de los generadores síncronos sean idénticas en todos los aspectos, excepto en el ángulo de fase, conduce a utilizar normalmente el circuito equivalente por fase. El circuito equivalente por fase de esta máquina se muestra a continuación en la figura. Se debe tener en cuenta un factor importante al utilizar el circuito equivalente por fase: las tres fases tienen igual voltaje y corriente solo las cargas conectadas a ellas están balanceadas. Si las cargas sobre el generador no están balanceadas, se requiere técnicas de análisis más sofisticadas.

Una carga se vuelve desbalanceada si no hay igualdad en la distribución entre fases de las cargas o por la existencia de muchas cargas no lineales en el sistema. O sea si en cada fase se conecta una carga diferente.

Circuito equivalente por fase:

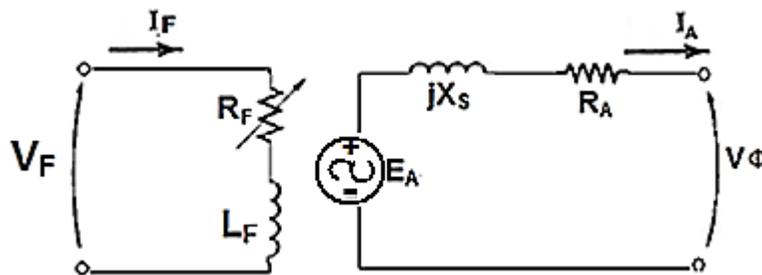


Figura. 6.3.4.

Estas 3 fases pueden conectarse en delta o en estrella de la siguiente manera:

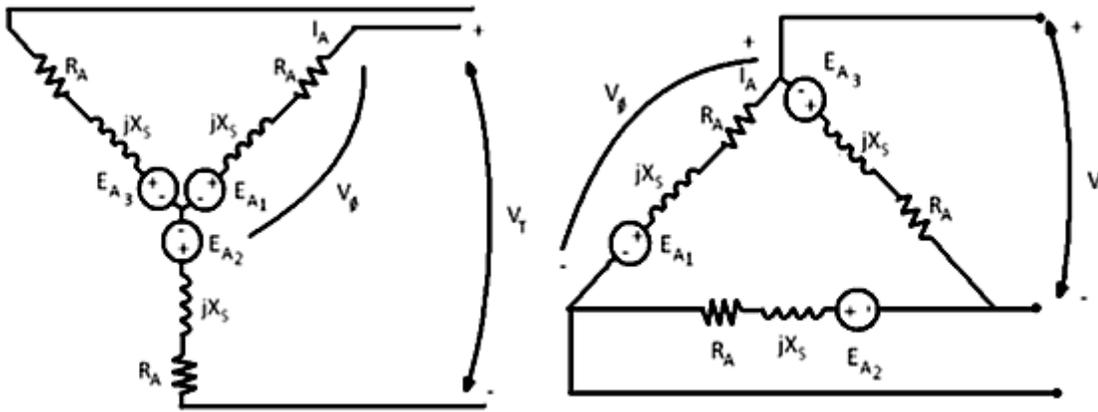


Figura. 6.3.5.

Si las fases se conectan en Y se cumple la relación:

$$V_L = \sqrt{3}V_\phi$$

Pero si las fases se conectan en Δ se cumple:

$$V_L = V_\phi$$

Máquinas eléctricas.

6.4. Excitación:

Actualmente los sistemas clásicos de excitación han sido sustituidos por otros sistemas de excitación que utilizan de una manera u otros dispositivos electrónicos varios:

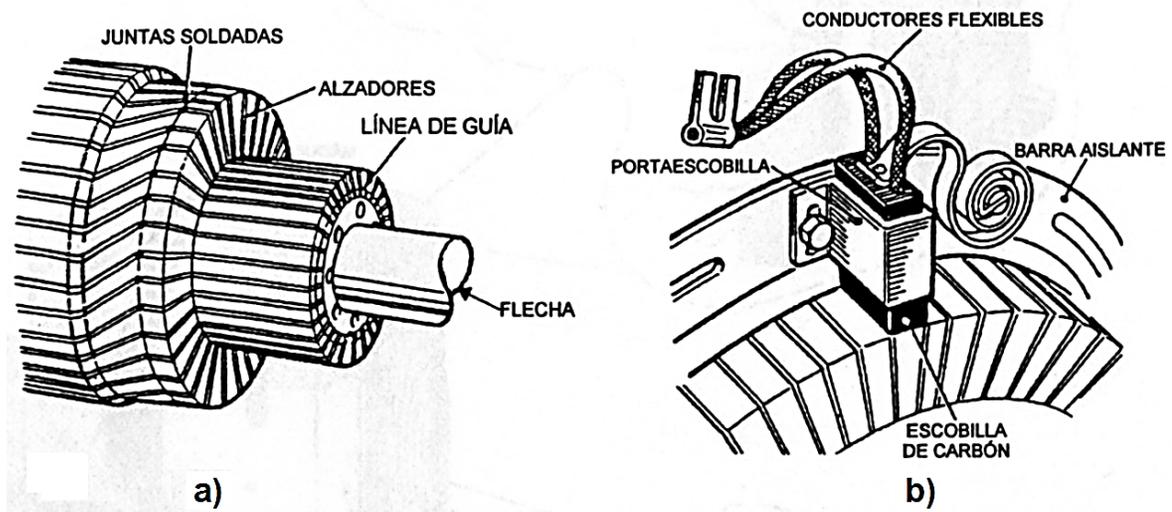
- Diodos.
- Transistores.
- Amplificadores magnéticos.
- Etc....

Con estos nuevos procedimientos, algunos en periodo de ensayo, se consiguen ventajas importantes, tales como: mayor velocidad de respuesta, menor oscilación en la tensión del alternador, etc....

Existen diferentes sistemas de excitación:

- 1) Sistemas de excitación con excitatriz de corriente directa:

Los pequeños grupos electrógenos o plantas de emergencia usan aun sistemas de excitación a base de pequeños generadores de corriente directa acoplados directamente al eje del generador, estos pequeños generadores de corriente directa en realidad generan corriente alterna y la rectifican por medio de un conmutador sobre el que se deslizan las escobillas.



Figuras. 6.4.1. a) Conmutador mostrando sus partes y b) Montaje de porta escobillas.

Uno de los problemas que presentan los sistemas de excitación a base de generadores de corriente continua es que requieren mayor mantenimiento que otros sistemas de excitación que se denominan “rotatorios sin escobillas”, o bien, estáticos. Este inconveniente ha hecho que para los generadores de tamaño relativamente grandes, no sean recomendables para los servicios de emergencia, además de que,

desde el punto de vista de operación, presentan otros problemas que eventualmente pueden afectar la calidad de la forma de onda.

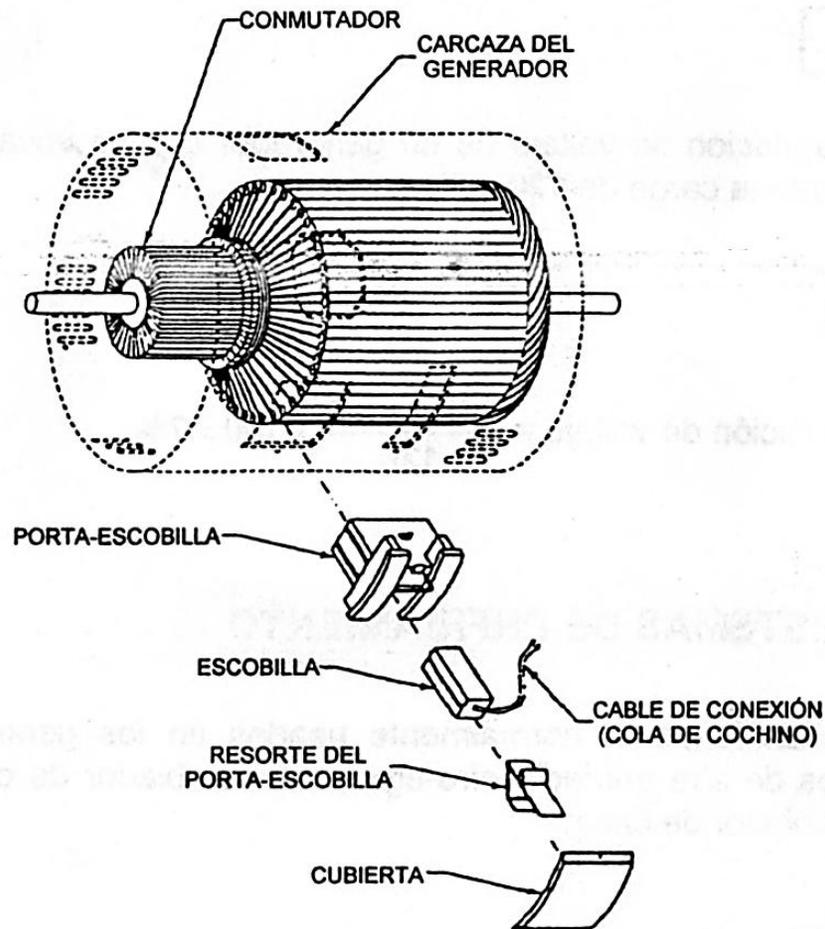


Figura. 6.4.2. Armadura y partes relacionadas en un generador de corriente continua usando como excitatriz.

2) Sistema de excitación de excitatriz sin escobillas:

Este tipo opera bajo el mismo principio que el anterior, solo que ahora se eliminan las escobillas y el conmutador, de hecho, la excitatriz es un generador de C.A. en los devanados rotatorios se rectifica por medio de diodos montados sobre la estructura rotatoria. El voltaje en C.D. producido por los rectificadores rotatorios se aplica directamente a los devanados de campo del generador, el regulador de voltaje controla la corriente de campo para obtener el voltaje deseado en las terminales.

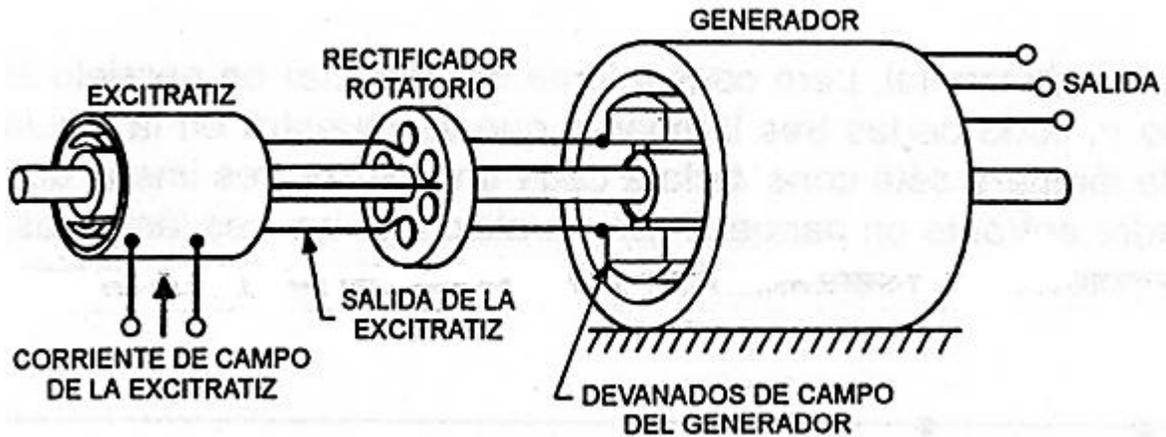


Figura. 6.4.3. Excitatriz sin escobillas.

Las ventajas sobre el sistema de excitación clásica (corriente continua) son:

- Apenas requiere mantenimiento.
- No existe problema de polvo de carbón ya que este sistema moderno no hay escobillas de ningún tipo.
- Al sistema no le afecta la contaminación atmosférica, dado que todos sus componentes se encuentran cerrados herméticamente.
- No se requiere reposición de escobillas, limpieza del colector...

3) Sistema de excitación "excitatriz estática":

O por transformador de compoundaje, consiste en que el devanado de campo del rotor es alimentado desde una fuente de alimentación a transformador y rectificadores que toma la tensión y corriente de salida del estator. El transformador, de tipo especial, posee dos devanados primarios, llamados de tensión e intensidad, que se conectan en paralelo y en serie a los bornes de salida del estator. El transformador convierte la tensión de salida a una más baja (30V aprox), que se rectifica y aplica al rotor por medio de escobillas y anillos deslizantes. Es un sistema con autorregulación intrínseca, ya que al tener el bobinado serie, al aumentar el consumo sobre el generador, aumenta el flujo del transformador y por lo tanto aumenta la excitación del generador.

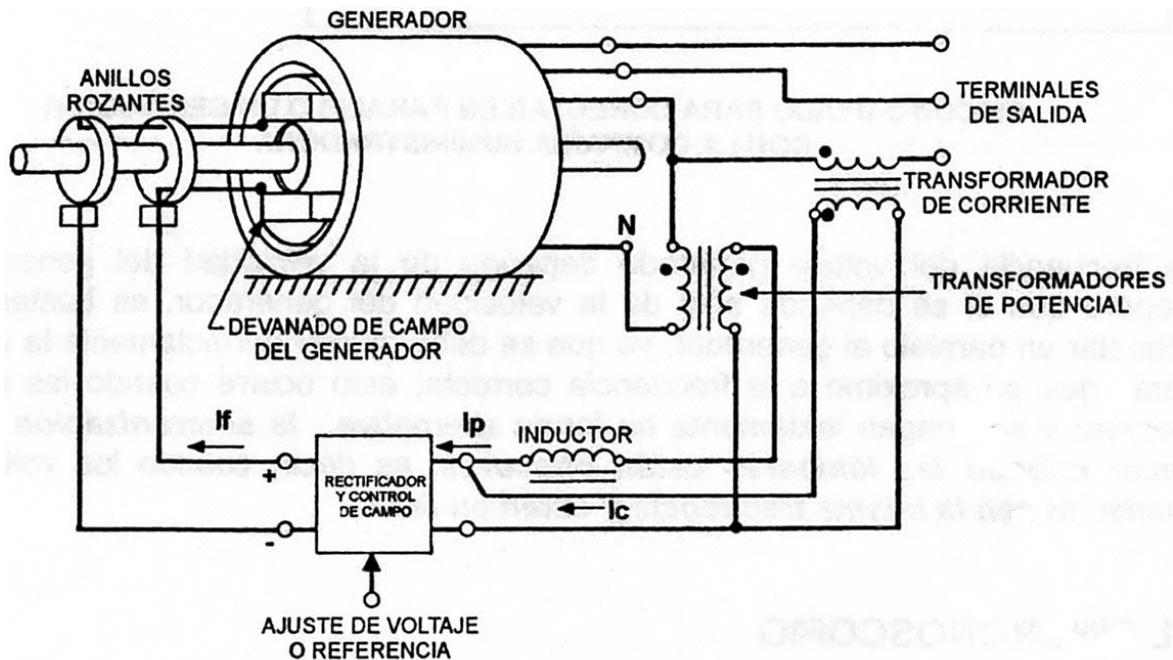


Figura. 6.4.4. Sistema de excitación estático.

6.4.1. Aplicaciones:

- Los sistemas eléctricos de potencia están constituidos por la interconexión de un gran número de generadores sincrónicos que trabajan en paralelo, interconectados mediante líneas de transmisión, y que suministran energía a gran número de cargas ampliamente distribuidas.
- Cuando su tamaño es grande, son los generadores que producen energía eléctrica que se emplean en las casas e industrias.
- Los generadores pequeños de ca se emplean para proporcionar energía eléctrica de emergencia.
- El generador trifásico entrega un suministro de energía más estable, por esta razón, se emplean para equipos de gran capacidad que operan a voltajes de 208 voltios o más. Entre estos equipos se incluyen grandes motores, máquinas de soldar, unidades calefactoras, estufas y casi todas las líneas de distribución de energía.

6.5. Ejercicios*.

Problema 6.5.1. Se tiene un alternador con los datos de placa siguientes:

Tensión entre fases.	=220 volts
Corriente	=5.25 amperes.
Velocidad	=1500 r.p.m.
Frecuencia	=50 Hertz.
Factor de potencia	=0.80 atrasado (-).
Número de fases	=3.
Conexión estrella.	

Determinar:

- La capacidad en kilovoltamperes (KVA).
- La capacidad nominal en kilowatts (KW).
- La capacidad en kilovoltamperes reactivos (KVAR).
- El ángulo de desplazamiento entre el voltaje (V) y la corriente (I).
- El diagrama vectorial de las potencias KVA, KW Y KVAR.

Solución.

- a).- La capacidad nominal en kilovoltamperes se obtiene a partir de la formula siguiente:

$$KVA = \sqrt{3} V I \times 10^{-3}$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$KVA = 1.73 \times 220 \times 5.25 \times 10^{-3} = 2$$

- b).- La capacidad nominal en kilowatts será:

$$KW = KVA \cos\varphi = 2 \times 0.80 = 1.6$$

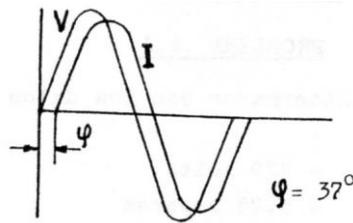
- c).- La capacidad en kilovoltamperes reactivos es:

$$KVAR = KVA \sen\varphi = 2 \times 0.6 = 1.2$$

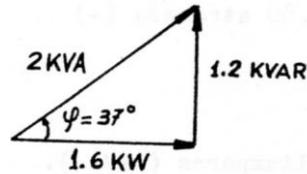
- d).- El ángulo de desplazamiento entre el voltaje y la corriente es:

$$\cos\varphi = 0.80 ; \quad \varphi = 37^{\circ}$$

Quiere decir que entre el voltaje y la corriente hay un desplazamiento de 37° , estando la corriente atrasada con respecto al voltaje. Tal como se muestra en la figura siguiente:



e).- El diagrama vectorial será:



Problema 6.5.2. Se tomaron los siguientes datos de un alternador:

Capacidad	= 6 KVA.
Tensión entre fases	= 230 volts.
Velocidad	= 1500 r.p.m.
Frecuencia	= 50 Hertz.
Número de fases	= 3
Conexión estrella.	

Determinar:

- a).- La corriente de línea del alternador.
- b).- El número de polos del alternador.

Solución.

a).- La corriente de línea de un alternador trifásico se determina a partir de la formula siguiente:

$$KVA = \sqrt{3} V_L I_L \times 10^{-3}$$

Siendo:

V_L = Tensión de línea del alternador.

I_L = Corriente de línea del alternador.

KVA = Capacidad del alternador.

Despejando la I_L , de la formula anterior, se tiene:

$$I_L = \frac{KVA}{\sqrt{3} V_L \times 10^{-3}} = \frac{KVA \times 10^{-3}}{\sqrt{3} V_L} = \frac{6 \times 1000}{1.73 \times 230} = 15.1 A$$

Máquinas eléctricas.

Que es la corriente de línea.

b).- El número de polos se obtiene empleando la formula siguiente:

$$P = \frac{2 \times 60f}{n}$$

Siendo:

f = la frecuencia del alternador en hertz.

n = la velocidad en revoluciones por minuto(r.p.m.)

P = el número total de polos.

Despejando a P, de la formula anterior se determina el número de polos.

$$P = \frac{2 \times 60 \times 50}{1500} = \frac{6000}{1500} = 4 \text{ polos}$$

Problema 6.5.3 ¿Cuál será la frecuencia de la tensión generada por un alternador, si la velocidad máxima es de 3000 r.p.m.?

Solución.

Al tener la máxima velocidad en un alternador, se tiene el mínimo número de polos; y el mínimo número de polos son 2 (un norte y un sur), por lo que se aplica la formula directamente.

$$f = \frac{P \times n}{2 \times 60} \quad \text{sustituyendo valores se tiene:} \quad f = \frac{2 \times 3000}{2 \times 60} = 50 \text{ hertz.}$$

Problema 6.5.4. ¿Cuál será la velocidad máxima del rotor de un alternador, si la frecuencia es de 60 Hertz.?

Solución.

La velocidad será máxima cuando el alternador tenga dos polos.

$$n = \frac{2 \times 60 \times f}{P} \quad \text{sustituyendo valores se obtiene:} \quad n = \frac{2 \times 60 \times 60}{2} = 3\ 600 \text{ r.p.m.}$$

Problema 6.5.5. Calcular:

a).- El número de polos requeridos por un alternador para generar una tensión con frecuencia de 60 Hertz; si es accionado por un primotor que gira a una velocidad de 720 r.p.m.

b).- La variación de velocidad del primotor para satisfacer la demanda de un alternador que varía el número de polos de 2 hasta 10 y se requiere una frecuencia de 25 Hertz.

Máquinas eléctricas.

c).- La frecuencia producida por un alternador de 10 polos girando a 1 800 r.p.m.

Solución.

a).- El número de polos requeridos por el alternador será:

$$P = \frac{2 \times 60 \times f}{n} = \frac{2 \times 60 \times 60}{720} = 10 \text{ polos.}$$

b).- La variación de la velocidad del primotor, para satisfacer la demanda en cada caso será:

Cuando el alternador tiene 2 polos.

$$n = \frac{2 \times 60 \times f}{P} = \frac{2 \times 60 \times 25}{2} = 1\,500 \text{ r.p.m.}$$

Cuando el alternador tiene 4 polos.

$$n = \frac{2 \times 60 \times f}{P} = \frac{2 \times 60 \times 25}{4} = 750 \text{ r.p.m.}$$

Cuando el alternador tiene 6 polos.

$$n = \frac{2 \times 60 \times f}{P} = \frac{2 \times 60 \times 25}{6} = 500 \text{ r.p.m.}$$

Cuando el alternador tiene 8 polos.

$$n = \frac{2 \times 60 \times f}{P} = \frac{2 \times 60 \times 25}{8} = 375 \text{ r.p.m.}$$

Cuando el alternador tiene 10 polos.

$$n = \frac{2 \times 60 \times f}{P} = \frac{2 \times 60 \times 25}{10} = 300 \text{ r.p.m.}$$

c).- La frecuencia producida por el alternador cuando tiene 10 polos y 1800 r.p.m. será:

$$f = \frac{P \times n}{2 \times 60} = \frac{10 \times 1800}{120} = 66.7 \text{ hertz.}$$

Problema 6.5.6. Se tiene un alternador que tiene una velocidad de 5 revoluciones por segundo (r.p.s.) y una frecuencia de 60 Hertz. Determinar:

a).- El número de polos del alternador.

b).- Los ciclos que genera en una revolución.

c).- Los grados eléctricos que contiene un grado geométrico.

d).- la velocidad en revoluciones por minuto (r.p.m.).

Máquinas eléctricas.

Solución.

a).- el número de polos del alternador es:

$$P = \frac{2 \times f}{n} = \frac{2 \times 60}{5} = 24 \text{ polos.}$$

En este caso “n” está en revoluciones por segundo, por lo que en la formula anterior el denominador no está afectado por la constante 60.

b).- Los ciclos que se generan en una revolución serán:

Si el alternador tuviera 2 polos, generaría un ciclo por revolución.

Si el alternador tuviera 4 polos, generaría dos ciclos por revolución.

Si el alternador tuviera 8 polos, generaría cuatro ciclos por revolución.

Por consiguiente si el alternador tuviera 24 polos, generaría doce ciclos por revolución; es decir:

$$\frac{60}{5} \frac{\frac{\text{ciclos}}{\text{seg}}}{\frac{\text{rev.}}{\text{seg}}} = 12 \frac{\text{ciclos}}{\text{rev.}}$$

c).- Los grados eléctricos que contiene un grado geométrico.

Por cada par de polos se tienen 360° E, en 24 polos se tendrán 360° E X 12 = $4\ 320^{\circ}$ E.

En 24 polos se tienen 360° G, entonces:

$$1 G^{\circ} = \frac{360^{\circ} E \times 12}{360^{\circ}} = 12^{\circ} E.$$

d).- La velocidad en revoluciones por minuto, será:

$$n = r.p.m. = r.p.s. \times 60 = 5 \times 60 = 300 r.p.m.$$

Problema 6.5.7. Un alternador trifásico tiene una conexión estrella, tensión entre terminales 450 volts y suministra una intensidad nominal de 300 amperes por cada terminal con un factor de potencia de 0.75 atrasado. Calcular:

a).- La tensión por fase.

b).- La intensidad por fase.

c).- Los KVA nominales.

d).- Los KW nominales.

Máquinas eléctricas.

Solución.

a).- La tensión por fase (V_F) será:

$$V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{450}{1.73} = 260 \text{ volts.}$$

b).- La intensidad por fase es:

$$I_F = I_L = 300 \text{ amperes, puesto que la conexión es estrella.}$$

c).- Los KVA nominales se obtienen a partir de la fórmula siguiente:

$$KVA = \sqrt{3} V_L I_L \times 10^{-3}$$

Sustituyendo valores:

$$KVA = 1.73 \times 450 \times 300 \times 10^{-3} = 233.55.$$

d).- Los KW nominales serán:

$$KW = KVA \cos\phi = 233.55 \times 0.75 = 175.16.$$

Problema 6.5.8. Un alternador trifásico conectado en delta, suministra una corriente de 100 amperes, una tensión de 240 volts por fase y un factor de potencia de 0.60 atrasado. Calcular:

a).- La tensión de línea.

b).- La corriente de línea.

c).- La potencia aparente en KVA.

d).- La potencia activa en KW.

Solución.

a).- La tensión de línea se obtiene:

$$V_L = V_f = 240 \text{ volts, puesto que la conexión del alternador es delta.}$$

b).- La intensidad de línea será: $I_L = \sqrt{3} I_f = 1.73 \times 100 = 173 \text{ amperes}$

c).- la potencia aparente en KVA es:

$$KVA = \sqrt{3} V_L I_L \times 10^{-3} = 1.73 \times 240 \times 173 \times 10^{-3} = 72 \text{ KVA.}$$

d).- La potencia activa en KW será: $KW = KVA \cos\phi = 72 \times 0.60 = 43.2$

Problema 6.5.9. ¿Cuál será la tensión efectiva (E) de una fase de un alternador trifásico, teniendo los siguientes datos?:

Máquinas eléctricas.

Número de espiras por fase (N)	= 240
Flujo por polo (ϕ_p)	= 2.08×10^6 maxwell.
Frecuencia (F)	= 60 Hertz.

Solución.

La tensión efectiva se determina por medio de la siguiente formula:

$E = 4.44 \times f \phi_p N \times 10^{-8}$ volts (Sistema C.G.S.). En la expresión anterior no se considera el factor de paso ni el factor de distribución, ya que en el planteamiento no se fijan las condiciones del devanado y por consiguiente se supone que el devanado es de paso completo y concentrado.

Sustituyendo valores en la expresión anterior se tiene:

$$E = 4.44 \times 60 \times 2.08 \times 10^6 \times 240 \times 10^{-8} = 1330 \text{ V.}$$

Problema 6.5.10. Se tomaron los siguientes datos de un alternador:

Número de polos	= 32
Velocidad	= 187 r.p.m.
Flujo por polo (ϕ_p)	= 7.2×10^5 maxwell.

Si la tensión por fase es de 1330 volts. Calcular:

- El número de espiras por fase.
- La tensión entre fase o de línea, si el alternador es trifásico.

Solución.

a).- El número de espiras por fase será:

$$E = 4.44 f \phi_p N \times 10^{-8} \text{ volts.}$$

Despejando "N" y sustituyendo valores se obtiene:

$$N = \frac{1330 \times 10^8}{4.44 \times f \times 7.2 \times 10^5}$$

Pero no se conoce la frecuencia; sin embargo con los datos que se tienen se puede conocer.

$$f = \frac{P \times n}{2 \times 60} = \frac{32 \times 187}{120} = 50 \text{ Hertz.}$$

Por tanto el número de espiras ya se puede determinar directamente entonces:

$$N = \frac{1330 \times 10^8}{4.44 \times 50 \times 7.2 \times 10^5} = 830 \text{ espiras.}$$

Máquinas eléctricas.

b).- La tensión de línea es:

$$E_L = \sqrt{3} E = 1.73 \times 1330 = 2300 \text{ volts.}$$

Problema 6.5.11. Si el alternador del problema anterior eleva su velocidad a 225 r.p.m. ¿Cuál será la tensión generada entre fases, si todas las demás características permanecen constantes, excepto la frecuencia?

Datos:

r.p.m.	= 225
Número de polos	= 32
Flujo por polo (ϕ_p)	= $7.2 \times 10^5 \text{ maxwell.}$
Número de espiras	= 830 por fase.
Número de fases	= 3

Solución.

La tensión de línea es:

$$E_L = \sqrt{3} E$$

Pero

$$E = 4.44 f \phi_p N \times 10^{-8} \text{ volts.}$$

Siendo la frecuencia.

$$f = \frac{P \times n}{2 \times 60} = \frac{32 \times 225}{120} = 60 \text{ Hertz.}$$

Entonces la tensión por fase será:

$$E = 4.44 \times 60 \times 7.2 \times 10^5 \times 830 \times 10^{-8} = 1592 \text{ volts.}$$

Sustituyendo en la primera expresión se tiene:

$$E_L = \sqrt{3} \times 1592 = 2750 \text{ volts.}$$

Donde se observa que hay un incremento de tensión, al incrementarse la velocidad.

6.7. Material didáctico*:

1. <http://www.tuveras.com/maquinasca/maquinasca.htm>
2. <http://www.tuveras.com/alternador/alternador.htm>
3. <http://www.tuveras.com/acoplamiento/alternadores.htm>
4. http://www.walter-fendt.de/ph14s/generator_s.htm
5. <http://www.youtube.com/watch?v=Vg06IUci05w>

Máquinas eléctricas.

7. MOTORES SINCRONOS.

7.1. Estructura.

ESTATOR.

Carcasa - Su función principal es apoyar y proteger el motor, también alberga el paquete de placas y el devanado del estator. Se puede construir en horizontal o vertical, con grado de protección de acuerdo con las necesidades del medio ambiente. La carcasa está construida de chapa y perfiles de acero soldados, con uniones realizadas utilizando el tipo de soldadura MIG, formando una estructura sólida y robusta que es la base de la máquina. El conjunto de alojamiento entero recibe un tratamiento de estandarización para aliviar las tensiones causadas por la soldadura. Esta construcción proporciona una excelente rigidez estructural de tal manera que pueda soportar los esfuerzos mecánicos de posibles cortocircuitos y vibraciones, lo que permite que el motor cumpla las especificaciones más severas. Internamente, la carcasa está constituida por largos carriles laterales dispuestos en la periferia para la fijación del paquete de placas con sus respectivos devanados. Normalmente, la carcasa está soportada sobre una base metálica rígida (chapa de acero), y esto a su vez soportado en una base de concreto. La fijación de la base metálica en la base de concreto se hace a través de pernos.



Figura. 7.1.1. Estator.

ESTATOR BOBINADO:

Está constituido de partes magnéticas estacionarias, incluyendo el paquete laminado de hojas de acero al silicio y el devanado del estator que opera con suministro de energía de corriente alterna para generar el campo magnético giratorio.



Figura. 7.1.2. Estator bobinado.

PAQUETE LAMINADO:

Está formado por láminas de acero de silicio con bajas pérdidas, presionadas y fijadas entre sí a través de una viga metálica o un sistema de vigas.

EXCITATRIZ:

Su función es proporcionar energía de magnetización para el bobinado de campo del motor. El excitador (brushless) está compuesto por rotor, estator, diodos, rectificadores y circuitos de disparo. El excitador estático consiste en anillos y cepillos y depende de una fuente externa para alimentar al campo del motor.

EL ROTOR:

El rotor puede ser construido con polos lisos o salientes dependiendo de las características constructivas del motor y de su aplicación. El rotor completo está formado por la estructura que compone o soporta los polos, los devanados de campo y la jaula de arranque, que son las partes activas giratorias del motor síncrono.

Los polos del campo son magnetizados a través de la corriente CC de la excitatriz o directamente por anillos recolectores y escobillas. En funcionamiento, los polos se alinean magnéticamente por el entrehierro y giran en sincronismo con el campo giratorio del estator. Los ejes son fabricados en acero forjado y mecanizados según las especificaciones. La punta de eje normalmente es cilíndrica o bridada.



Figura. 7.1.3 Rotor

Cojinetes:

En función de la aplicación, los motores síncronos pueden ser suministrados con cojinetes de rodamiento o cojinetes de deslizamiento.

Cojinetes de rodamiento:

Estos cojinetes están normalmente constituidos por rodamiento de esferas o de rodillos cilíndricos, dependiendo de la rotación y de los esfuerzos axiales y radiales a los que son sometidos, en algunas aplicaciones pueden ser utilizados rodamientos especiales. Los cojinetes de rodamientos pueden ser lubricados con aceite o grasa.

Cojinetes de deslizamiento

Los cojinetes de deslizamiento pueden tener lubricación natural (auto-lubricables) o lubricación forzada (lubricación externa).

Máquinas eléctricas.

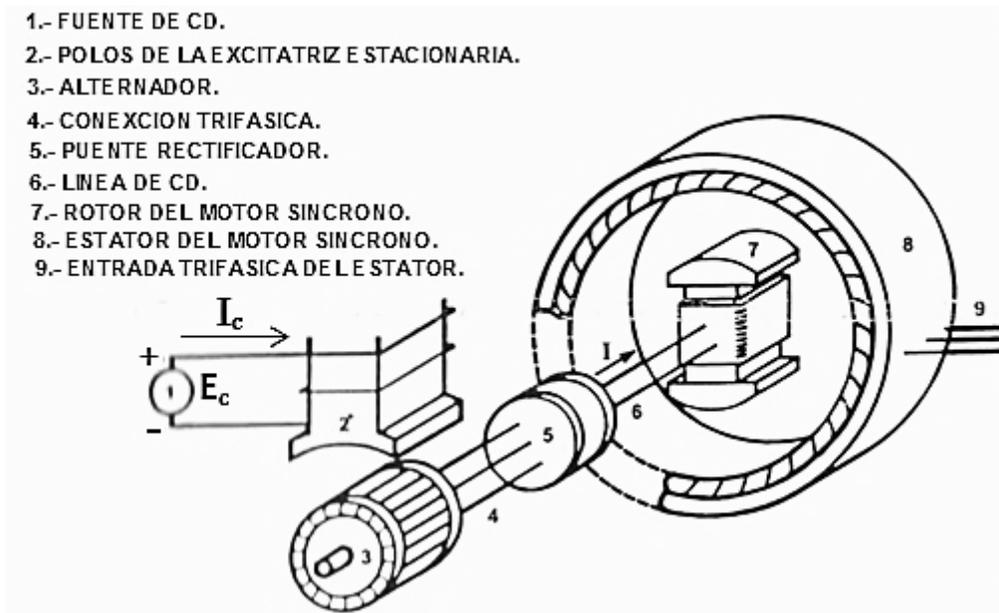
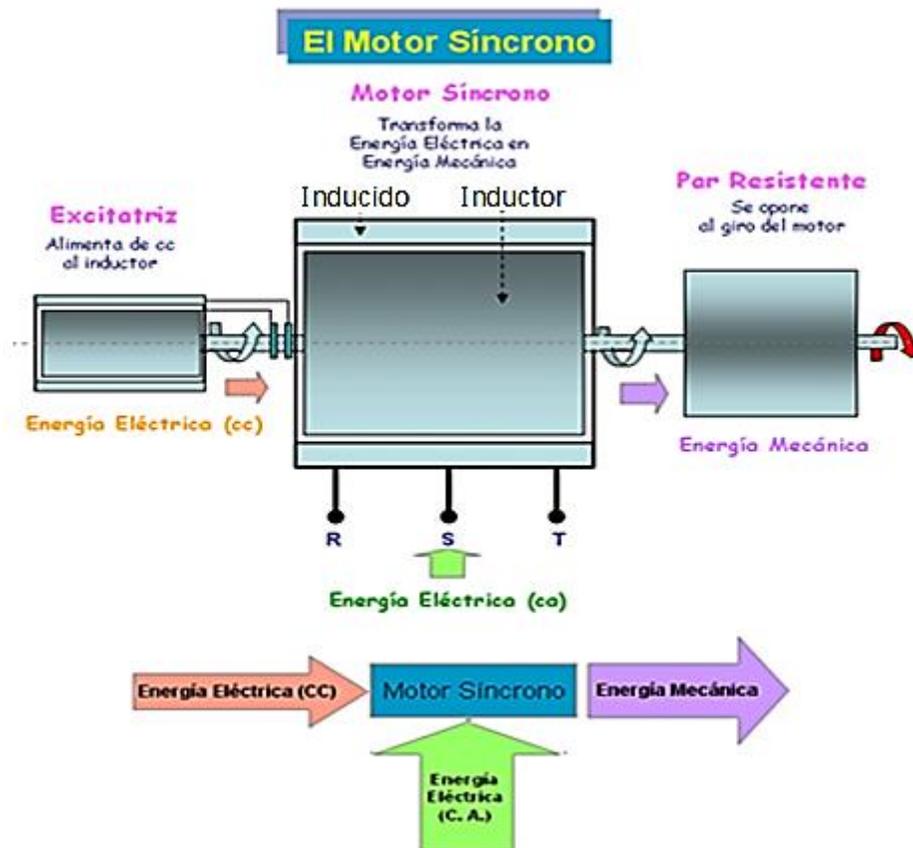
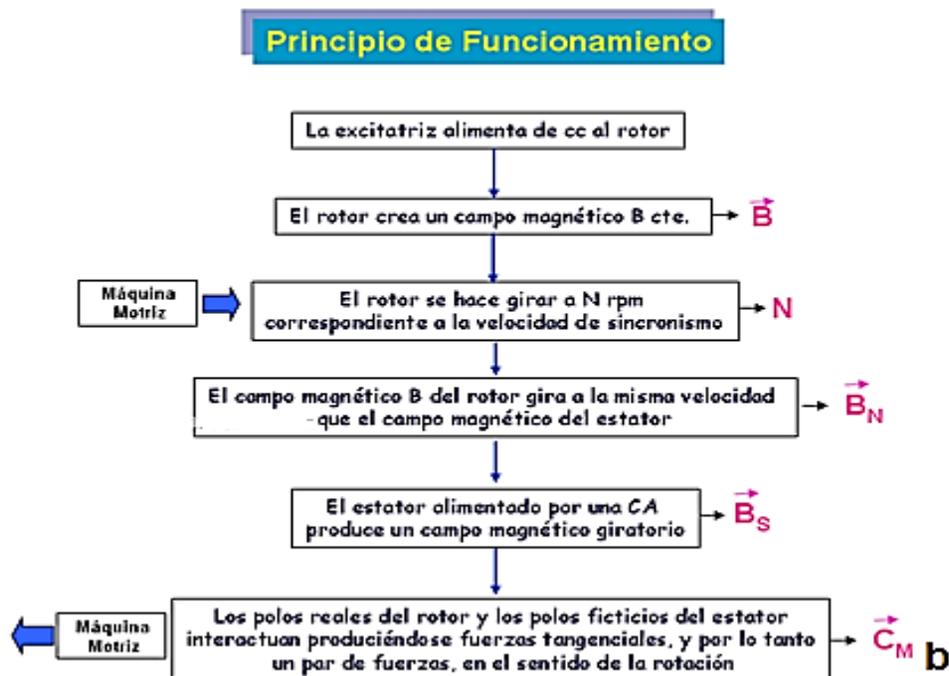


Figura. 7.1.4. Diagrama mostrado las partes principales de un motor síncrono.

7.2. FUNCIONAMIENTO:





Figuras. 7.2.1. a) El motor síncrono. Y b) Principio de funcionamiento.

Introducción:

Estos motores se denominan sincrónicos, porque la velocidad de giro depende únicamente de la frecuencia de la corriente de alimentación y del número de polos, siendo independiente de la carga que deba vencer. Esta velocidad está dada por la relación:

$$N = 120 f / p$$

donde f es la frecuencia de la red y p el número de polos del conductor.

De esta propiedad surge la limitación de uso de los motores sincrónicos, que se emplean cuando se requiere una velocidad absolutamente constante. Para los demás casos se prefieren los motores asincrónicos que son más sencillos y generalizados.

Principio de funcionamiento:

Observando la figura (7.2.2). En un instante determinado, durante medio ciclo de la corriente alternada, la corriente circulara en el sentido indicado por las flechas. Como la corriente es variable también lo será el campo magnético producido por ella y entre este campo y el otro del rotor, se ejercerá una acción dinámica que tendera a desplazar al rotor en un sentido que se obtiene aplicando la regla de la mano izquierda.

En el caso de la figura (7.2.2), para la rama izquierda de la espira colocaremos la palma de la mano en posición vertical y vuelta hacia la derecha, de acuerdo con la polaridad Norte. Los dedos estirados deben señalar hacia fuera, pues esa es la dirección de la corriente en el conductor; es decir que la muñeca queda contra la pared y los dedos saliendo de él. El pulgar en tal situación indicara hacia abajo, es decir que el conductor tendera a ser

Máquinas eléctricas.

desplazado hacia abajo, pero como esta fijo, el campo magnético será repelido hacia arriba, girando entonces el rotor en el sentido indicado en la figura.

Para la rama derecha de la espira se podría demostrar que el movimiento de giro coincide con el producido en la otra rama, aplicando, la misma regla.

Después de transcurrido medio ciclo, la corriente en los conductores de la espira cambia de sentido de circulación, pero si en el mismo tiempo el rotor ha dado media vuelta, también se habrá producido una inversión en los sentidos de las líneas de fuerza, pues tendremos el polo Norte a la derecha y el Sur a la izquierda. Cambiando los sentidos de las corrientes y del campo al mismo tiempo, el movimiento permanece en el mismo sentido.

Esto dice que para que un motor síncrono comience a funcionar regularmente, se debe tener que el rotor gire a velocidad tal, que se produzca al mismo tiempo la inversión de la corriente y de la polaridad magnética en cada punto de la vuelta completa. Como cuando el rotor está detenido ello no es posible, estos motores requieren ser llevados a la velocidad de sincronismo mediante un motor o dispositivo auxiliar.

Una vez que el rotor gira a esa velocidad, el funcionamiento se hace normal, la acción de repulsión entre el estator y el rotor suministra la fuerza necesaria para que el giro continúe y solo se detendrá si se corta la corriente del rotor, del estator, o de la si la fuerza a vencer es mayor que la que puede suministrar el motor, en cuyo caso se dice que el mismo desengancha, debiéndose hacer arrancar nuevamente si se quiere que siga funcionando.

En la práctica, ni el estator tiene una sola espira, ni el rotor un solo electroimán. El arranque se consigue con un motor auxiliar de potencia reducida o dotando al motor de un arrollamiento especial para que arranque como asíncrono.

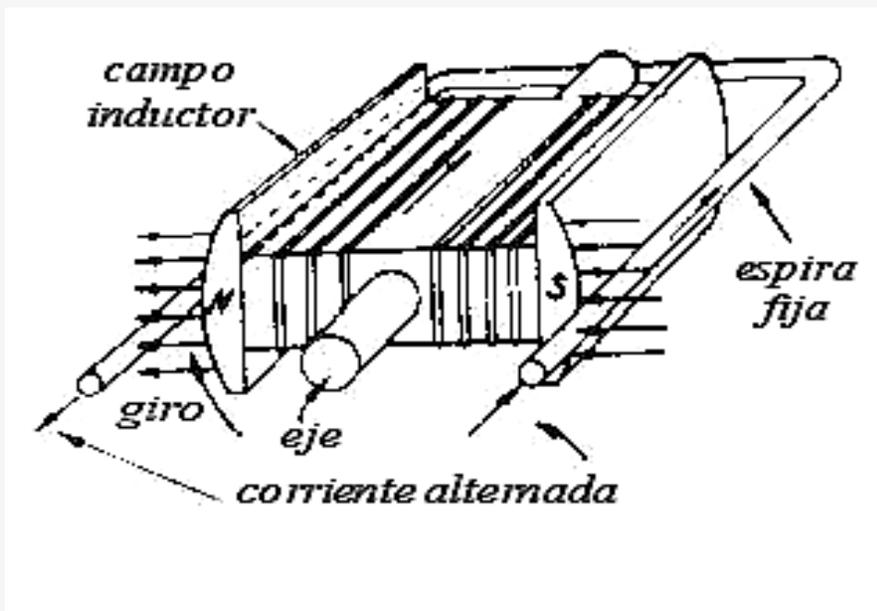


Figura. 7.2.2.

Campo giratorio:

Hasta aquí hemos considerado al motor síncronico como una espira fija que formaba el estator, y un par de polos que forma el rotor. En la práctica, los motores síncronos son trifásicos, de manera que por lo menos tendrán tres bobinados iguales desplazados 120° geométricos en la periferia del estator. La rueda polar o rotor tendrá tantos polos como los que tenga el bobinado del estator.

A fin de comprender mejor el funcionamiento de los motores síncronos, nos referiremos al tipo de campo magnético formado por un devanado trifásico, repartido en la periferia del estator y alimentado por un sistema trifásico sinusoidal, de acuerdo a la figura (7.2.3), estando las tres sinusoides desplazadas 120° entre sí.

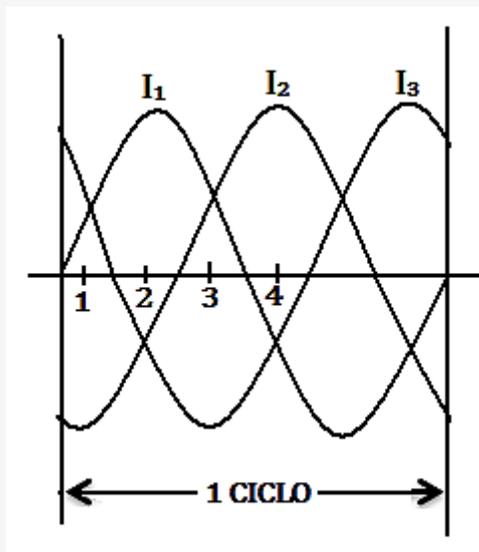


Figura. 7.2.3.

En el estator colocaremos tres bobinados iguales, pero apartados de 120° geométricos, en la forma que se ve en la figura (7.2.4).

En el interior del estator el flujo magnético resultante será la suma de los producidos por las tres bobinas, de manera que en cada instante habrá que sumar gráficamente los tres flujos de sus respectivas bobinas. Usamos para ello los diagramas vectoriales, pero aplicados a los flujos alternos. Pero debe hacerse una aclaración: el sentido de las líneas de fuerzas de un campo magnético depende del sentido de circulación de la corriente que lo produce, tal como resulta de aplicar la regla del tirabuzón. De manera que si aplicamos el tirabuzón a las bobinas de nuestro estator supongamos que cuando la corriente es positiva, o sea hacia arriba del eje en la figura (7.2.3), el flujo será saliente desde el centro geométrico del estator, y cuando la corriente es negativa será entrante hacia el centro O.

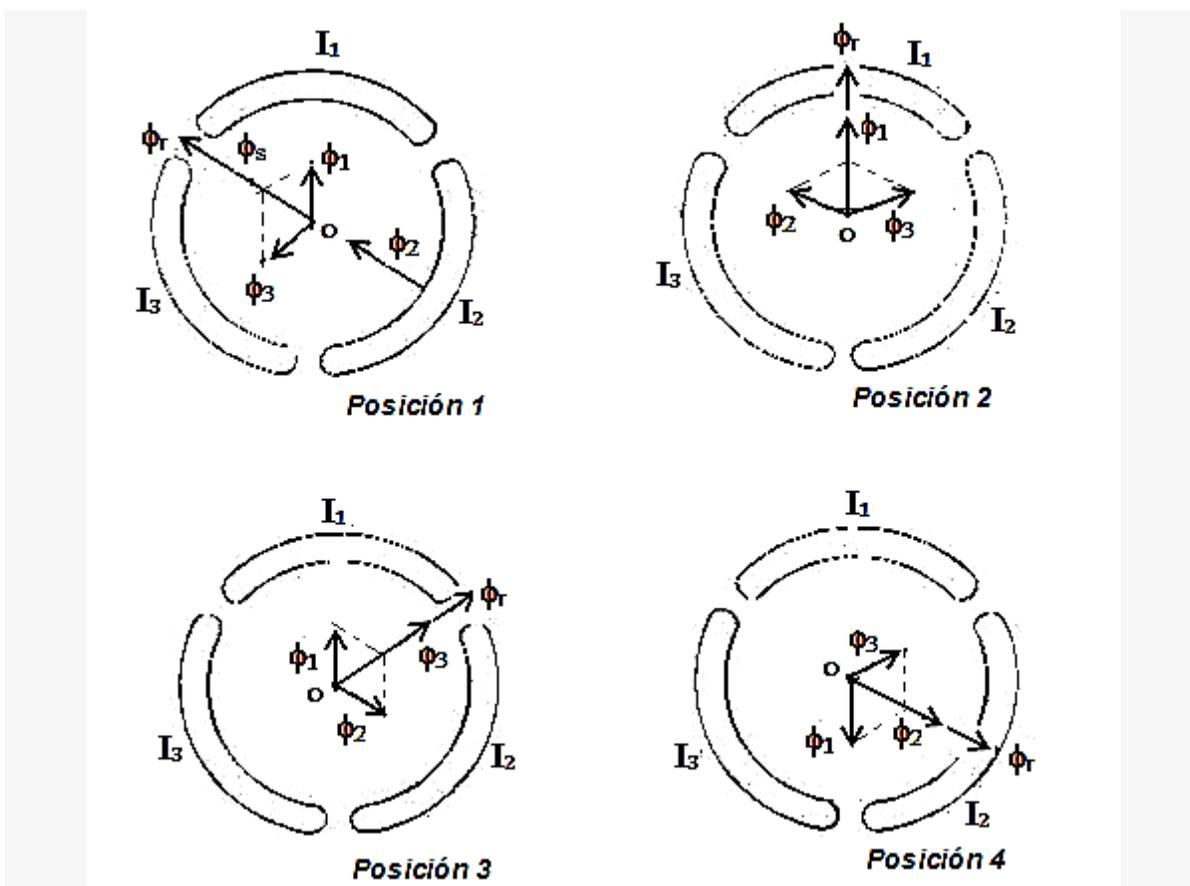


Figura 7.2.4.

Tomemos la posición 1, que corresponde a un instante determinado. Las tres corrientes tienen valores que se pueden ver en la figura (7.2.3). I_1 e I_3 , tienen la mitad del valor máximo, y son positivas, mientras que I_2 , tiene su valor máximo, pero es negativa. Llevemos esto al gráfico de los flujos de cada bobina. Los de las bobinas recorridas por I_1 e I_3 tendrán un valor dado, proporcional a esas corrientes, y estarán dirigidas hacia afuera desde O ; el flujo producido por I_2 , será doble de los otros y estará dirigido hacia adentro, es decir, hacia O , pero lo podemos dibujar saliendo de O en dirección opuesta a su bobina. Sumemos ahora los tres flujos y vemos que da una resultante en la dirección del 2, y con valor:

$$r = 1.5 I_2$$

Y como el $N^\circ 2$ estaba en su valor máximo, se ve que el flujo resultante es 1,5 veces el valor máximo de cualquiera de las fases.

Pasemos ahora al instante 2, de la figura (7.2.4). Aquí la corriente I_1 tiene su valor máximo positivo, y su flujo deberá ser saliente de O , y hacia su bobina. Las otras dos corrientes tienen la mitad del valor máximo, pero negativa, y sus flujos deben converger hacia O , o también salir de O pero en dirección opuesta. En la figura se ve que sumando los tres vectores se obtiene un vector resultante igual al de la posición anterior, pero desplazado de un cierto ángulo en el sentido de las agujas del reloj.

Pasemos ahora a las posiciones siguientes, y se ve que si se procede en la misma forma, el flujo resultante de la posición 3 está dado por el mismo valor que en las otras posiciones, pero corrido más hacia adelante en el sentido del reloj. Y es evidente, pues la suma geométrica se hará con un flujo negativo y máximo, correspondiente a la corriente I3, que será el único que sale de O en dirección opuesta a su bobina, y dos flujos de valor mitad del máximo, en dirección positiva, es decir, desde O hacia sus respectivas bobinas. Y para la posición 4 resulta también un flujo del mismo valor pero desplazado angularmente.

Si se hiciera esta operación para todas las posiciones o instantes durante un ciclo, se vería que siempre el flujo resultante en el interior del estator tiene un valor constante, pero se desplaza continuamente girando en un sentido determinado. Cambiando la sucesión de fases, gira en sentido contrario. Esto permite considerar a ese campo como equivalente al producido por una corriente continua, pero que girara continuamente en torno al estator. Por este motivo tal campo se llama: *giratorio*.

Y lo que sucede durante un ciclo se repetirá en los demás, de manera que con un sistema de tres corrientes alternadas desfasadas eléctricamente, que recorren tres bobinas desplazadas geométricamente, se consigue un campo magnético que no es alternado sino constante en valor y signo, pero que gira con velocidad uniforme, dada por la conocida expresión:

$$N = 120 f / p$$

en revoluciones por minuto. Es evidente que el número de polos p debe intervenir, pues en la figura (7.2.4), hemos considerado un solo bobinado por fase, lo que da dos polos únicamente. Cuando hay más polos, se cumple un ciclo en menos de una vuelta. La frecuencia f de la red adonde se conecta el bobinado del estator también interviene, pues es la que da la velocidad de rotación de las fases, o también, la duración del período.

Efecto del campo giratorio:

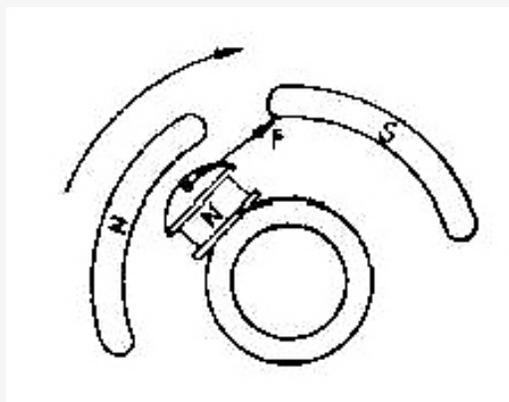


Figura. 7.2.5.

Volvamos ahora a nuestro motor síncrono, y vemos que debemos colocar una rueda polar que tenga tantos polos como el bobinado del estator, para que a cada norte del estator corresponda uno en el rotor, y así sucesivamente. Si hacemos girar el rotor hasta que coincida con la velocidad de sincronismo se producirán los siguientes efectos: en el momento que un polo norte de la rueda polar está frente a un polo del devanado del estator que en ese momento tenga ni cara norte hacia adentro, se produce un rechazo entre los

dos polos nortes y la masa polar del rotor será atraída por la sección de bobinado estático que está colocado inmediatamente próximo a la periferia. Como debe haber igual cantidad de polos en el estator como en el rotor, esto mismo está sucediendo con todos los demás polos, uno de los cuales se ve en la figura (7.2.5), y como el campo giratorio gira en el sentido indicado por la flecha, el rotor girará en el mismo sentido. La fuerza que impulsa a girar al rotor está dada por la ley de atracción y repulsión de masas magnéticas, de modo que dependerá de la intensidad de los campos magnéticos de la rueda polar y del estator o lo que es lo mismo, del flujo magnético del rotor y de la intensidad de corriente en el estator. Al eje del motor se aplica el mecanismo que este debe mover, y que por lo tanto opondrá cierta resistencia al giro. Si la cupla que suministra el motor es mayor que la opuesta por la resistencia mecánica, el rotor girará con velocidad constante cualquiera que sea esa resistencia puesto que la velocidad sincrónica depende de la frecuencia y número de polos, que son invariables y no de la carga.

Si la cupla resistente supera a la cupla motora el movimiento se frena, deteniéndose el rotor lo que se llama *desenganche*.

Resumiendo, para poner en funcionamiento un motor sincrónico hay que provocar que la rueda polar enganche con el campo giratorio, para lo cual hay que hacerlo girar hasta alcanzar o sobrepasar la velocidad de sincronismo, dejándolo entonces libre. En esas condiciones el motor engancha y mantiene una velocidad constante, igual a la sincrónica, mientras la resistencia opuesta al movimiento no sea tan grande que provoque él desenganche. Si esto sucediera hay que volver a realizar la maniobra de puesta en marcha. De estas consideraciones se deduce que los motores sincrónicos serán aplicables en aquellos casos en que se requiera una velocidad absolutamente constante, pues su mayor costo con respecto a otros motores de corriente alternada y el inconveniente de necesitar corriente continua para los campos restringe su margen de aplicación. Posteriormente veremos que a veces se le utiliza por su cualidad de compensador del desfasaje de la red.

Para las redes de 50 ciclos por segundo de frecuencia se construyen motores sincrónicos cuyo número de polos debe estar de acuerdo con la velocidad sincrónica deseada. La tabla adjunta da las velocidades respectivas:

Velocidades síncronas a 50 HZ

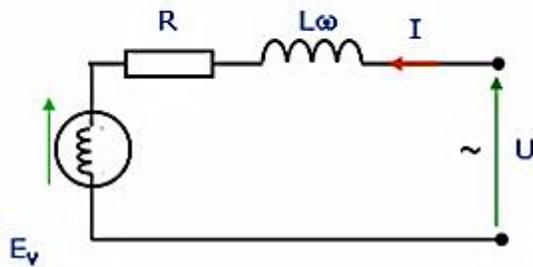
Nº de Pares de Polos p	Velocidad síncrona n_s Rev / min.	Nº de Pares de Polos p	Velocidad síncrona n_s Rev / min.
1	3000	7	429
2	1500	8	375
3	1000	9	333
4	750	10	300
5	600	12	250
6	500	15	200

Tabla 7.2.6.

7.3. Circuito equivalente:

Circuito Equivalente. Diagrama de Blondel

Al conectar el motor síncrono a la red, el estator se comporta como el primario de un transformador

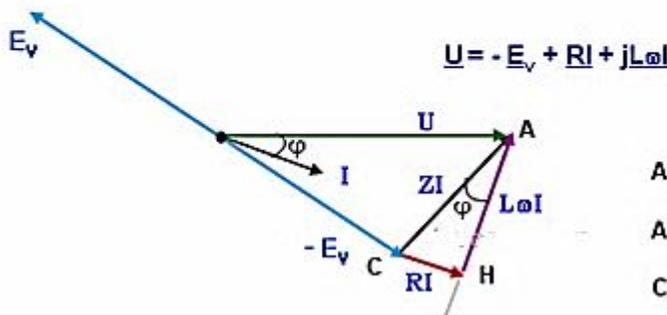


- R = resistencia inducida por fase
- $L\omega$ = caída inductiva
- E_v = tensión autoinducida por fase
- U = tensión de fase de la línea

Figura 7.3.1. Circuito equivalente del motor síncrono.

Diagrama de Blondel

El diagrama de Blondel supone que L es cte. Para todos los regímenes de funcionamiento y el alternador es de polos lisos.



$$\underline{U} = -\underline{E}_v + \underline{R}I + j\underline{L}\omega I$$

- $AC = ZI = KI$
- $AH = ZI \cos \varphi = \frac{U}{Z} ZI \cos \varphi = KP = K' C$
- $CH = L\omega I \sin \varphi = \frac{U}{Z} L\omega I \sin \varphi = KQ$

Figura. 7.3.2. Diagrama de Blondel.

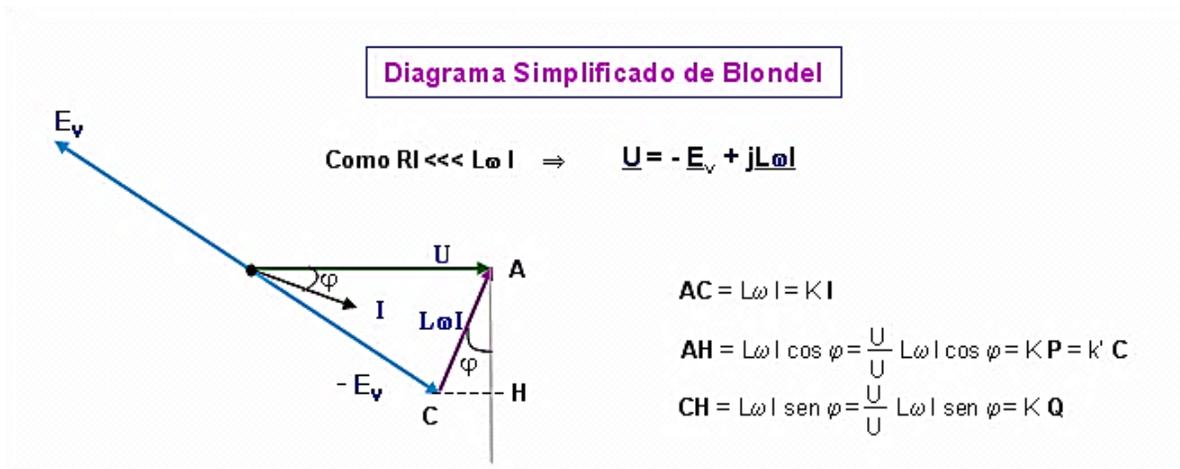


Figura. 7.3.3. Diagrama de Blondel simplificado.

7.4. Características:

Un motor síncrono funciona literalmente "el tiempo con" o "En sincronismo con" sistema de potencia. Los motores síncronos se utilizan con más frecuencia por las industrias debido al hecho de que tienen Características de operación especial. El alto rendimiento y el hecho de que pueden trabajar como compensador síncrono para corregir el factor de potencia en red, se destacan como las principales razones que dan lugar en la elección de motores síncronos para conducir diversos tipos de cargas. Alto par, velocidad constante y carga variaciones bajos costes de mantenimiento, son también características operación especial que proporcionar numerosas ventajas económicas y operativas a el principio de operación del usuario.

Corrección del factor de potencia:

Los motores sincrónicos pueden ayudar a reducir los costos de energía eléctrica y mejorar el rendimiento del sistema de energía, corrigiendo el factor de potencia en la red eléctrica donde están instalados. En pocos años, el ahorro de energía eléctrica puede igualarse al valor invertido en el motor.

Un beneficio adicional, puede ser de alguna manera incrementar el voltaje. El factor de potencia es, en principio mejor corregido en la fuente, esto significa en la planta o sitio de la carga corregida, una forma conveniente de estudiar la corrección del factor de potencia, es por medio de ejemplos, auxiliándose de diagramas vectoriales.

Ejemplo:

Una planta industrial representa una carga de 1600 KVA a un factor de potencia de 0.6 atrasado, calcular:

Máquinas eléctricas.

- La capacidad en KVA del condensador síncrono que se debe instalar en paralelo con esta carga para corregir el factor de potencia a un valor unitario.
- Los KW totales de la carga.

Solución:

- Para un factor de potencia global de valor unitario, el condensador síncrono tendrá en sentido opuesto la componente vertical (potencia reactiva) de la planta la cual es:

$$1600 \operatorname{sen} 53^{\circ} = 1280 \text{ KVAR}$$

- La carga total es:

$$1600 \times \cos 53^{\circ} = 960 \text{ KW}$$

El diagrama vectorial correspondiente a esta condición se muestra en la siguiente figura:

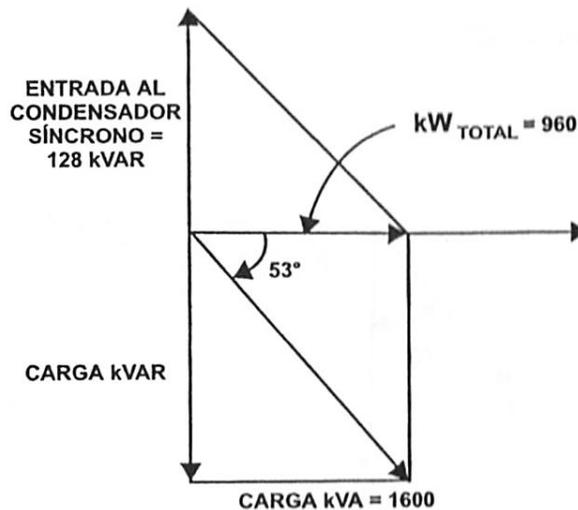


Diagrama vectorial.

Se observa que la capacidad de suministro se reduce de 1600 KVA a 900 KVA (FP. 1.0) a la capacidad de 1280 KVA del condensador síncrono.

Velocidad constante:

Los motores síncronos mantienen la velocidad constante tanto en las situaciones de sobrecarga como durante momentos de oscilaciones de tensión, respetándose los límites del conjugado máximo (pull-out).

Alto rendimiento:

En la conversión de energía eléctrica en mecánica es más eficiente, generando mayor ahorro de energía. Los motores síncronos son proyectados para operar con alto

Máquinas eléctricas.

rendimiento en un amplio rango de velocidad y para proveer un mejor aprovechamiento de energía para una gran variedad de cargas.

Alta capacidad de torque:

Los motores síncronos son proyectados con altos torques en régimen, manteniendo la velocidad constante, incluso en aplicaciones con grandes variaciones de carga.

Mayor estabilidad en la utilización con convertidores de frecuencia:

Puede actuar en un amplio rango de velocidad, manteniendo la estabilidad independiente de la variación de carga (ej.: laminadoras, extrusoras de plástico, etc.).

Mantenimiento reducido:

Por no necesitar de contactos eléctricos de deslizamiento para su funcionamiento, los motores síncronos BRUSHLESS no poseen escobillas ni anillos colectores y con esto eliminan la necesidad de mantenimiento, inspección y limpieza en estos componentes.

Cálculos para el motor operando bajo carga:

Se puede tener una comprensión de la operación de un motor síncrono, haciendo referencia a un circuito equivalente como el mostrado en la figura, que se hace generalmente en forma monofásica para un motor que tiene conexión estrella, esto se hace en forma idéntica que para un generador síncrono en su circuito equivalente, debido a que ambos tipos de máquinas están constituidas de la misma forma.

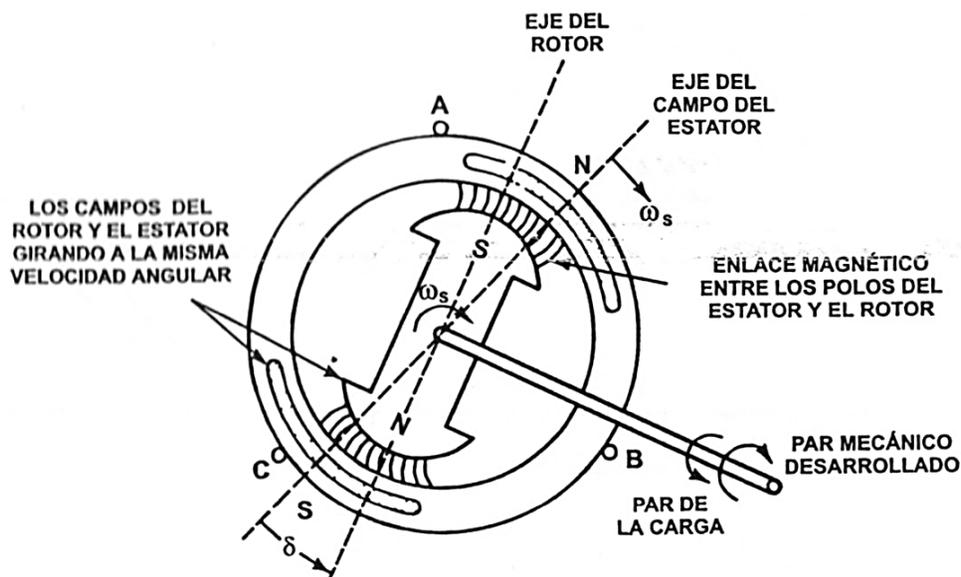


Figura. 7.4.1. Par desarrollado en un motor síncrono.

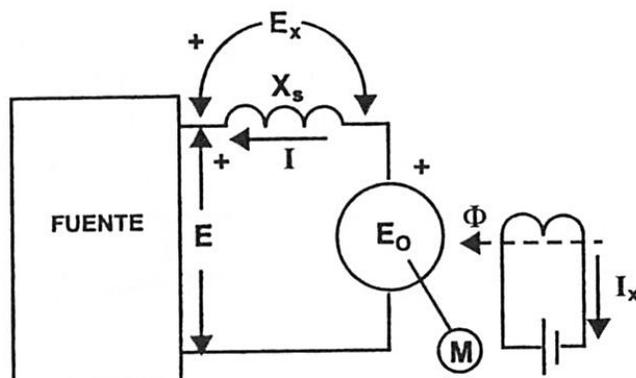


Figura. 7.4.2. Circuito equivalente de un motor síncrono mostrado una fase.

Cuando el flujo Φ creado por el rotor induce un voltaje E_0 en el estator, el valor del flujo depende de la corriente de excitación en C.D. I_x , por lo tanto E_0 varía con I_x .

Como ya se ha mencionado, los polos del rotor y del estator están alineados cuando el motor opera en vacío, bajo estas condiciones se induce un voltaje E_0 que está en fase con el voltaje de línea a neutro E .

Si adicionalmente se ajusta la excitación de manera que $E_0=E$ el motor “flota” sobre la línea y la corriente de línea I es prácticamente cero, ya que solo se requiere corriente para alimentar las pérdidas por fricción y ventilación, y entonces es prácticamente despreciable.

Cuando se aplica carga mecánica al eje del motor, el rotor baja su velocidad lentamente, produciendo que los polos del rotor se retrasen con respecto a los polos del estator un ángulo α , debido a este desplazamiento E_0 alcanza su máximo valor un poco después, por lo tanto si se refiere a la siguiente figura E_0 es ahora δ grados eléctricos detrás de E . el desplazamiento mecánico α produce un desfase eléctrico δ entre E_0 y E . el desplazamiento de fase produce una diferencia de potencial E_x a través de la reactancia síncrona X_s dado por la expresión:

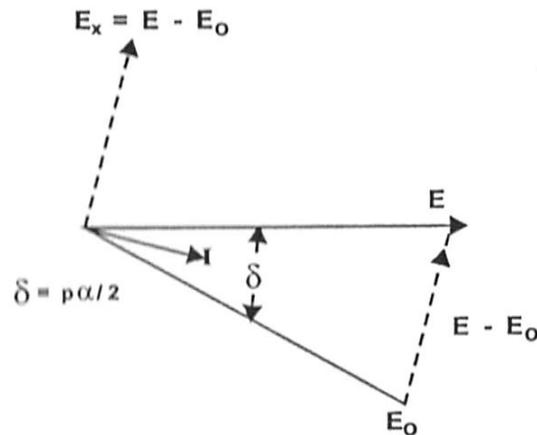
$$E_x = E - E_0$$

En consecuencia, una corriente I debe circular en el circuito dada por:

$$jIX_s = E_x$$

De donde:

$$I = -jE_x/X_s = -j(E - E_0)/X_s$$



MOTOR BAJO CARGA

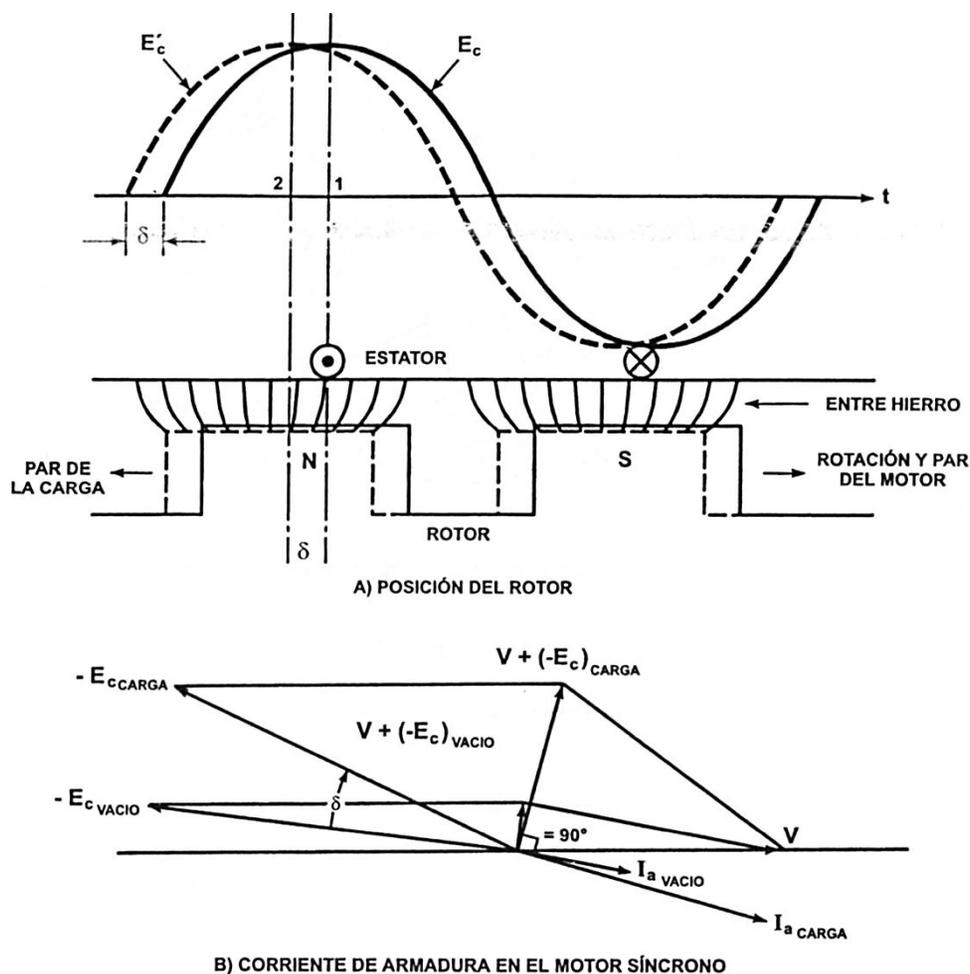
La corriente se atrasa 90° detrás de E_x debido a que X_s es inductiva, el diagrama vectorial bajo carga es el de la figura anterior, debido a que I está casi en fase con E , el motor absorbe potencia mecánica, excepto por las relativamente pequeñas pérdidas en el cobre y en el hierro en el estator.

En la práctica, el voltaje de excitación E_0 se ajusta para ser mayor o menor que el voltaje de alimentación E , su valor depende de la potencia de salida del motor y del valor deseado del factor de potencia.

Regresando al asunto original de cómo un motor síncrono ajusta por sí mismo los cambios en la carga, supóngase que la carga se incrementa en el eje, debido a que la velocidad promedio debe permanecer constante, no puede demandar que se incremente la corriente de línea en la misma forma como ocurre con los motores de corriente directa (es decir, operando a velocidad reducida).

Para ver que ajuste debe tener lugar en un motor síncrono, se puede hacer referencia a la siguiente figura, donde se muestran dos polos salientes, en un instante cuando están opuestos dos conductores en el estator, los conductores se supone que tienen un paso polar separado y la $FEM_{inducida}$ en los conductores, es como se muestra; máxima cuando los conductores están opuestos al centro del polo y cero cuando están a la mitad de los mismos.

Para cualquier otra posición con respecto a las cargas polares el voltaje inducido es como se muestra por la curva E_c . Al aplicar un incremento en el eje del rotor, se presenta una reducción de velocidad momentánea.



Figuras. 7.4.3. a) y b). Efecto del incremento de carga en el eje.

Con la reducción de velocidad toma tiempo para que un motor incremente su potencia de línea. En otras palabras, aun cuando permanezca girando a velocidad síncrona, el rotor tendrá un deslizamiento en la carga, esta acción se puede visualizar como sigue:

Supóngase que el vínculo magnético entre los campos del rotor y el estator como una liga o banda elástica, cuando se incrementa la carga en la flecha o eje, la banda o liga se esfuerza con una cantidad determinada por el par de la carga, esto produce que el rotor se desplace hacia atrás en el espacio por un ángulo δ . Este ángulo a plena carga puede llegar a ser hasta de 60° eléctricos, para una máquina de dos polos a plena carga. En el diagrama se observa que el voltaje neto de V y $(-E_c)$ es:

$$V + (-E_c)$$

Y depende de la posición de E_c , el valor de I_A es directamente proporcional a esta suma vectorial y dado que el devanado del estator es predominante inductivo, la corriente se atrasa con respecto al voltaje neto por un ángulo de aproximadamente 90° . En forma

análoga con el motor de corriente directa, la corriente en la armadura I_A en el motor síncrono es:

$$I_A = \frac{V + (-E_C)}{Z_S}$$

Dónde:

Z_S = Impedancia por fase del devanado del estator.

Por lo tanto, cuando se carga la máquina el rotor asume una posición angular de retorno a su posición de vacío o no carga, esto produce que el motor incremente su demanda de potencia de la red o línea de alimentación, para compensar el incremento en la carga en su eje y sin cambiar su velocidad promedio. La potencia total suministrada al motor por fase es:

$$P = V I_A \cos \Phi \text{ W/fase}$$

Dónde:

V = Voltaje por fase en volts.

Φ = Ángulo entre U e I_A .

La potencia total mecánica desarrollada (potencia en el entrehierro) es:

$$P_d = E_C I_A \cos \alpha \text{ W/fase}$$

Dónde:

α = Ángulo de fase entre los vectores E_C e I_A .

La potencia neta en el eje o flecha es menor que P_d debido a las pérdidas rotacionales. La diferencia entre P y P_d son las pérdidas en el cobre de la armadura $I_A^2 R_A$.

Finalmente la banda de hule se rompe si la carga en la máquina continúa incrementándose, cuando esto sucede, se dice que la máquina perdió sincronismo. En otras palabras, se espera demasiado del motor.

Ajuste de la excitación en el campo:

Cuando la corriente de excitación en C.D. se aumenta, la velocidad del motor síncrono permanece constante, pero su fuerza electromotriz inducida E_C se debe incrementar debido a la resistencia del campo del rotor, podría parecer que el motor se para o bien arranca para actuar como generador cuando la fuerza electromotriz inducida tiende a ser igual o mayor que el voltaje de línea respectivamente; sin embargo, el motor síncrono continúa operando como motor, aun cuando la FEM exceda al voltaje de línea.

Máquinas eléctricas.

En estas condiciones, se dice que el motor opera sobreexcitado, con el resultado que demanda potencia de la línea de alimentación y con factor de potencia adelantado, se muestra como sucede esto en la siguiente figura.

Suponiendo que el motor se ajusta de manera tal que opera a factor de potencia unitario, es decir, la corriente de armadura I_A está en fase con el voltaje de línea, como se muestra en (A), todos los cálculos se hacen por fase, de la ecuación $I_A = \frac{V - E_c}{Z_s}$ se observa que la corriente de armadura es proporcional a la suma vectorial del voltaje de línea V y la fuerza contraelectromotriz y E_c limitada por la impedancia Z_s , bajo esta suposición del valor de excitación de campo E_c aumentado pero con la carga en la máquina sin aumentar, el ángulo δ permanece sin cambio.

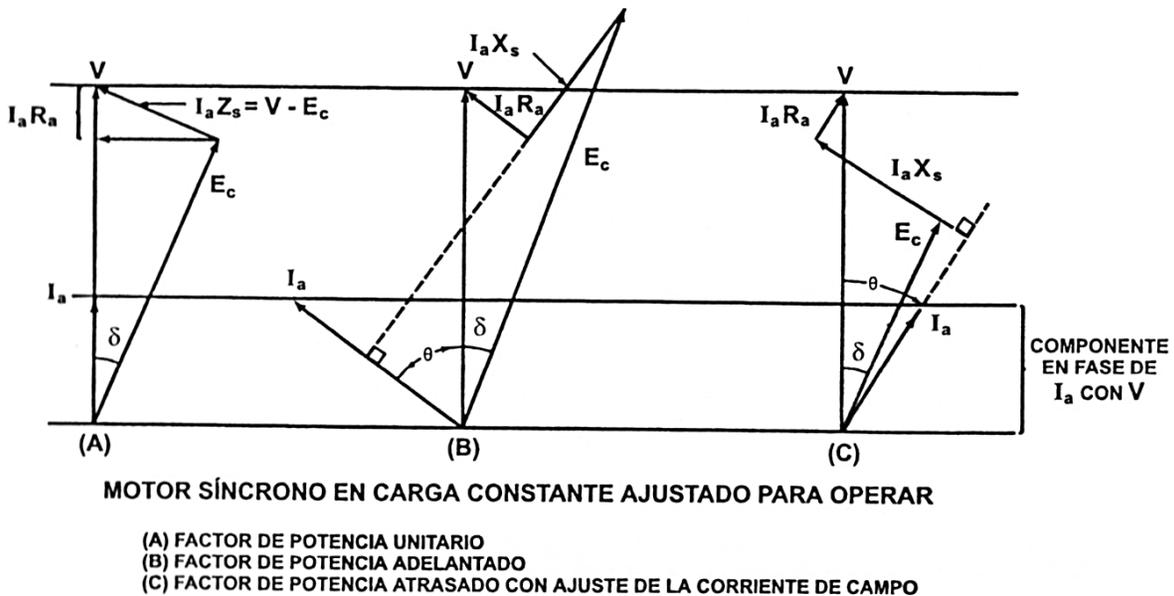


Figura. 7.4.4.

Debido a que la suma de los vectores V y E_c se incrementa y la impedancia es constante, la corriente de armadura se debe incrementar; sin embargo, la potencia de la carga permanece constante, lo cual implica que el ángulo de fase se debe cambiar de tal manera que la componente en fase de la corriente de armadura con el voltaje terminal permanece sin cambio, es decir: $I_A \cos \Phi$ es constante, como se muestra en (B) de la figura anterior considerando a continuación un decremento en la excitación del campo, la fuerza contraelectromotriz E_c tiende a ser menor, y como antes, la componente en fase de la corriente de armadura con el voltaje de línea V debe permanecer dado que la potencia entregada es constante, esto significa que la suma vectorial de V y E_c otra vez es mayor, comparada con el caso de factor de potencia unitario.

La corriente de armadura se incrementa dependiendo de si este voltaje se incrementa, y esto se puede hacer solo cambiando el factor de potencia a un ángulo atrasado, como se

muestra en la figura (C). El signo menos en E_C solo indica un defasamiento de 180° por fase, de modo que:

$$I_A Z_S = V + (-E_C) = V - E_C$$

Donde $I_A Z_S$ es la caída de voltaje en el circuito de la armadura, el valor de Z_S del motor se obtiene de forma similar que para el generador síncrono, es decir llevando a cabo dos pruebas: la prueba de circuito abierto y la prueba de cortocircuito.

Prueba de circuito abierto o de vacío:

En esta prueba la maquina se acciona hasta que alcanza su velocidad síncrona y el voltaje terminal en circuito abierto $V = (E_f)$ se mide en la medida que se va modificando la corriente de campo I_f . La curva que muestra la variación de E_f con I_f se conoce como la característica de circuito abierto, debido a que las terminales se mantienen abiertas, esta curva muestra la variación del voltaje de excitación E_f con la corriente de campo I_f .

Se debe observar que en la medida que la corriente de campo se incrementa, el circuito magnético muestra el efecto de saturación. La línea que pasa a través de la parte lineal de la característica de circuito abierto se conoce como "la línea de entrehierro". El voltaje de excitación podría tener cambios a lo largo de esta línea, si no hay efectos de saturación magnética en la máquina.

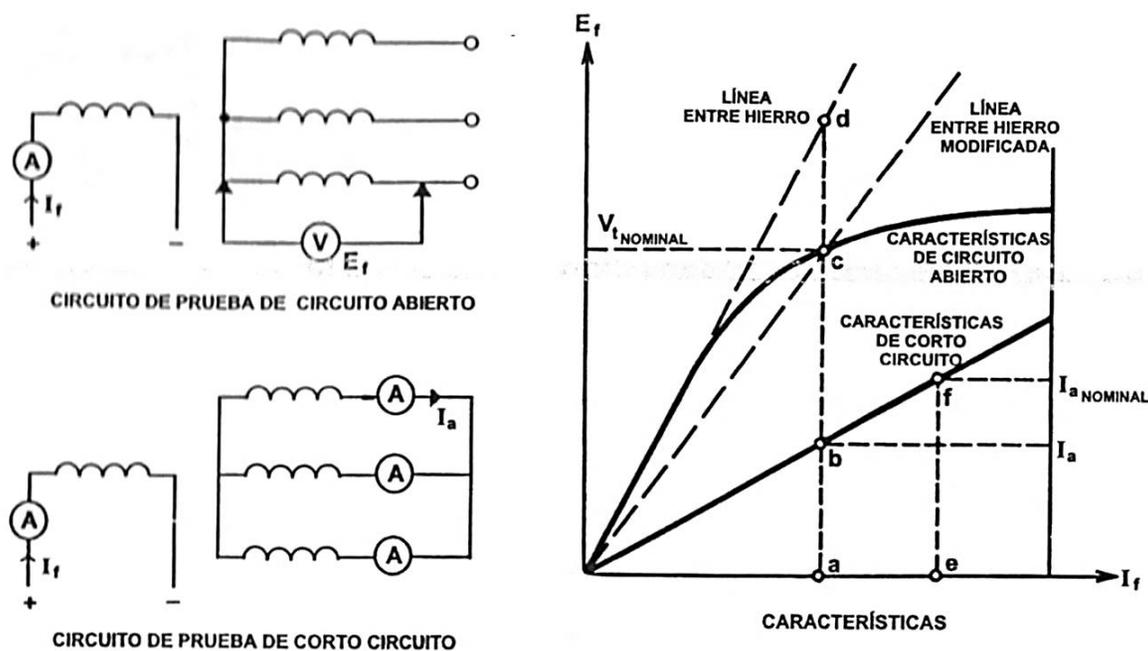


Figura. 7.4.5. Características de circuito abierto y de corto circuito.

La prueba de cortocircuito:

El arreglo del circuito para esta prueba se indica también en la figura anterior, los amperímetros se conectan en cada fase y las terminales se ponen en corto, la maquina síncrona se acciona a velocidad síncrona. La corriente de campo I_f se varía y el promedio de las tres corrientes de armadura se mide, la variación de la corriente de armadura con la corriente de campo se muestra en la curva característica anterior "característica de cortocircuito".

Obsérvese que esta característica es una línea recta y esto se debe al hecho de que bajo condiciones de cortocircuito, el circuito magnético no se satura debido a que el flujo de entrehierro permanece a un nivel bajo, se puede explicar esto con el circuito equivalente que bajo condiciones de cortocircuito y como R_A es mucho menor X_S , la corriente de armadura I_A se atrasa con respecto al voltaje de excitación E_C por casi 90° . El circuito equivalente es mostrado en la figura, donde: $E_r = I_A (R_A + jX_{A\ell})$, debido a que tanto R_A como $X_{A\ell}$ son pequeños, a corriente nominal el voltaje de entrehierro es menor en 20% del voltaje nominal.

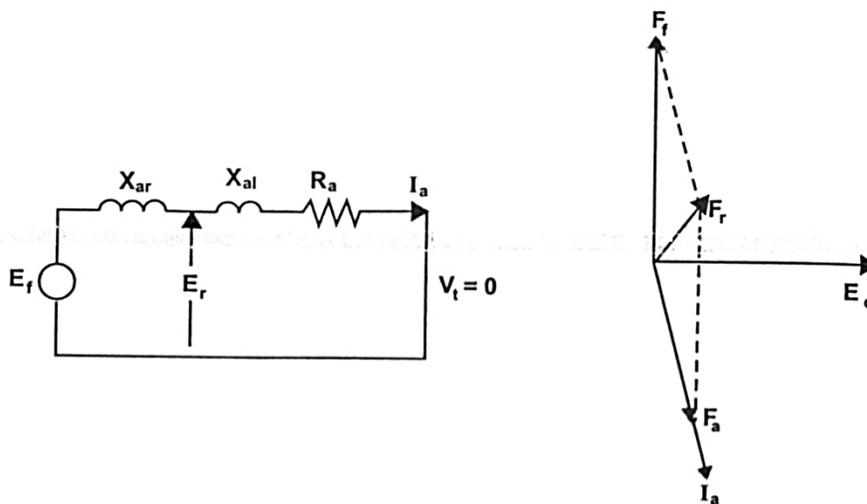


Figura. 7.4.6. Circuito y diagrama vectorial de la operación del generador bajo condiciones de cortocircuito.

Los diagramas fasoriales:

Los diagramas fasoriales muestran la relación entre voltajes y corrientes tanto para los generadores como para los motores síncronos y se muestran en las siguientes figuras, estos diagramas están basados en los circuitos equivalentes por fase para una maquina síncrona. El voltaje terminal se toma como el fasor de referencia para la construcción del diagrama fasorial.

El circuito equivalente para un generador se muestra a continuación en donde por conveniencia la corriente I_A se indica saliendo de la maquina (generador) en el caso del

motor se mostraría entrando. El fasor para el voltaje de excitación E_C se obtiene sumando las caídas de voltaje $I_A R_A$ y $jI_A X_S$ al voltaje terminal V_t .

$$E_C = V_t + I_A R_A + jI_A X_S$$

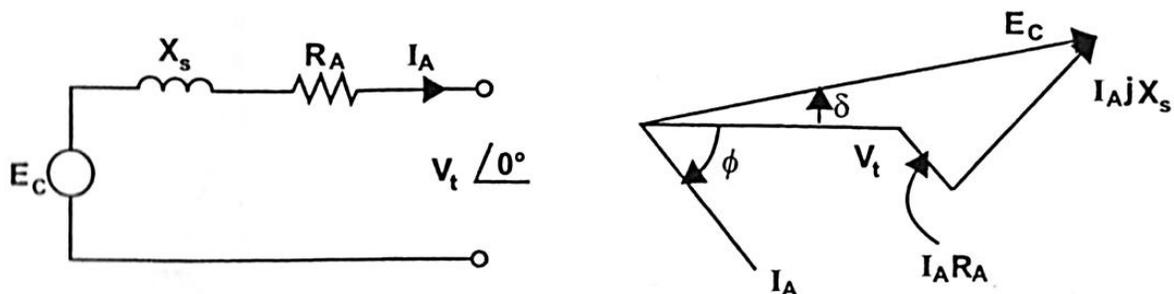


Figura. 7.4.7. Diagrama fasorial para el generador.

En el caso del motor síncrono, la corriente circula hacia el motor, como se muestra en la figura:

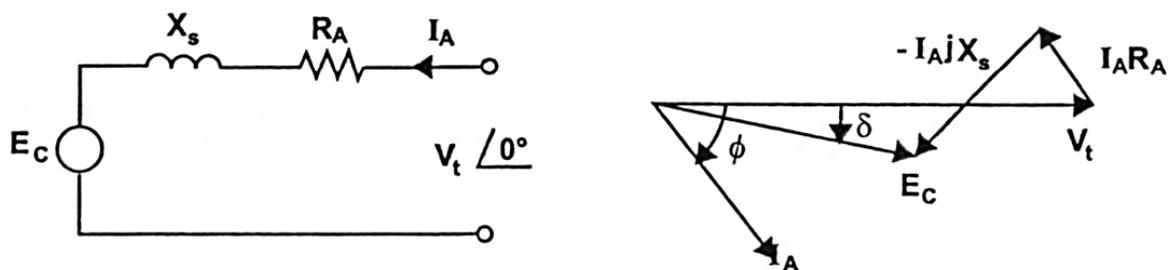


Figura. 7.4.8. Diagrama fasorial para el motor.

$$V_t = E_C + I_A R_A + jI_A X_S$$

$$E_C = V_t \angle 0^\circ - I_A R_A - jI_A X_S = \bar{E}_C \angle -\delta$$

El fasor E_C se construye restando las caídas de voltaje con respecto al voltaje terminal, en este caso, también se considera que el motor demanda corriente atrasada de la fuente de alimentación. Es importante notar que el ángulo δ entre V_t y E_C es positivo para la acción del generador y negativo para la acción del motor, este ángulo δ , conocido también como ángulo de potencia juega un papel muy importante en la potencia transmitida y en la estabilidad de la operación de una máquina síncrona.

El diagrama fasorial basado en el modelo de la fuente de corriente equivalente es el que se muestra a continuación, en este caso la corriente del estator I_A se toma como referencia por ser más conveniente.

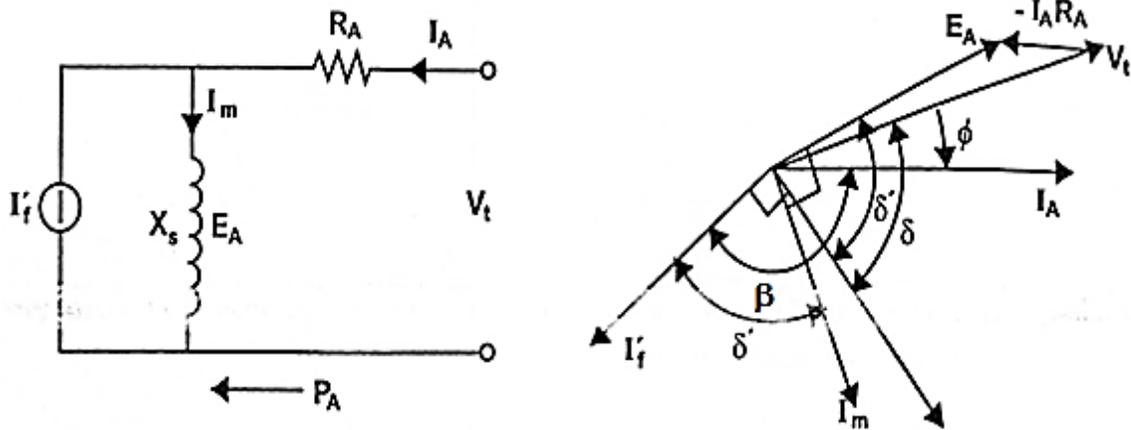


Figura. 7.4.9. Diagrama fasorial para el motor basado en el modelo de la fuente de corriente.

Se debe observar que el ángulo entre E_A y E_C es el mismo que el ángulo entre I_m o I_f . si R_A se desprecia, este ángulo es el ángulo de potencia (ángulo entre los fasores V_t y E_C) al ángulo entre I_A e I_f se le conoce como ángulo β .

Ejemplo:

Un motor síncrono de 75 HP, 440V, 900 RPM trifásico, está conectado en estrella y tiene una resistencia de armadura efectiva de $R_A = 0.15 \Omega$ con una resistencia sincrónica $X_S = 2.0 \Omega/fase$, operando a plena carga y factor de potencia 0.8 atrasado calcular:

- El ángulo del par δ .
- La potencia mecánica desarrollada, suponiendo una eficiencia del 90%.

Solución:

- En general, la operación de un motor síncrono sobreexcitado o subexcitado se puede representar de acuerdo con los siguientes diagramas fasoriales.

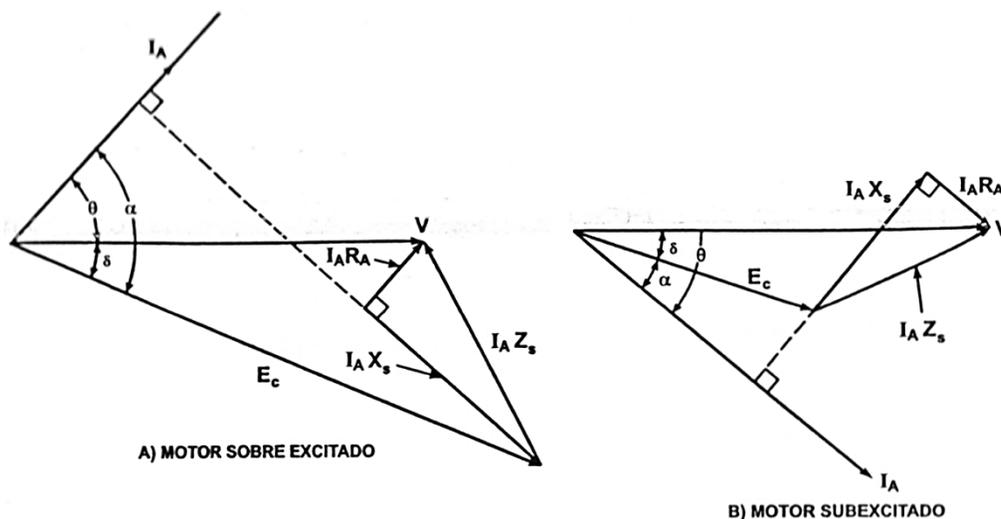


Figura. 7.4.10. Diagrama fasorial del motor síncrono.

La potencia de entrada al motor es:

$$P_{en} = \frac{HP \times 746}{\eta} = \frac{75 \times 746}{0.90} = 6216 \text{ W}$$

La corriente de línea:

$$I = \frac{P_{en}}{\sqrt{3}V_L \cos \Phi} = \frac{62167}{\sqrt{3} \times 440 \times 0.8} = 102 \text{ A}$$

El voltaje al neutro:

$$V_N = \frac{440}{\sqrt{3}} = 254 \text{ V}$$

El ángulo de fase:

$$\Phi = \cos^{-1} 0.8 = 36.9^\circ \text{ adelantado.}$$

Haciendo referencia a la figura (A) anterior, se puede tomar el vector V como una referencia y la impedancia síncrona a partir de los valores de R_A y X_s es:

$$Z_s = \sqrt{2^2 + 0.15^2} \angle \tan^{-1} 2/0.15 = 2.006 \angle 85.7^\circ \Omega$$

El valor de E_c está determinado como:

$$E_c = V - I_A Z_A = V \angle 0^\circ - I_A \angle \Phi \times Z_s \angle \beta = 254 \angle 0^\circ - 102 \angle 36.9^\circ \times 2.006 \angle 85.7^\circ$$

$$E_c = 364 - j172 = 403 \angle -25.3^\circ \text{ V}$$

El signo negativo indica que E_c se atrasa por un ángulo de 25.3° que representa el ángulo del par δ .

b) La potencia mecánica desarrollada se obtiene a partir de la ecuación.

$$P_d = 3E_c I_A \cos \alpha$$

$$= 3 \times 403 \times 102 \times \cos 62.2^\circ = 62167 - 3 \times 102^2 \times 0.15 = 57484 \text{ W}$$

Ejemplo:

Se tiene un motor síncrono trifásico conectado en estrella de 15 HP, 400 V que tiene una eficiencia a plena carga del 90%, su reactancia síncrona $X_S = 3 \Omega/fase$, $R_A = 0.15 \Omega/fase$. El motor opera a plena carga a un factor de potencia de 0.8 adelantado. Determinar:

- El ángulo de potencia.
- La corriente de campo.
- La mínima corriente de armadura y la correspondiente corriente de campo, despreciando el valor de R_A .

La característica de saturación para este motor se da en la siguiente figura.

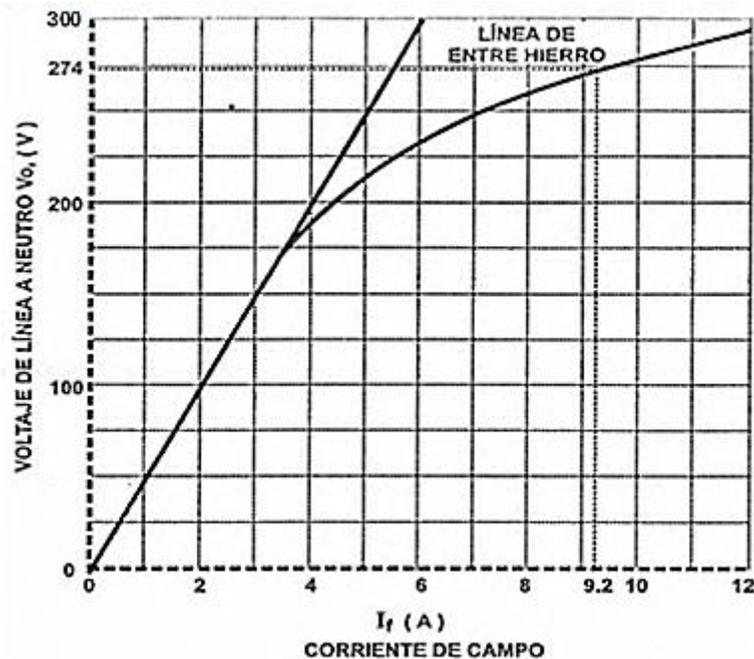


Figura. 7.4.11.

- a) El voltaje de fase a neutro:

$$V_t = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V}$$

La potencia de entrada al motor:

$$P_e = \frac{HP \times 746}{\eta} = \frac{15 \times 746}{0.90} = 12433 \text{ W}$$

La corriente de armadura:

$$I_A = \frac{P_e/3}{V_t \cos \Phi} = \frac{12433/3}{231 \times 0.8} = 22.4 \text{ A}$$

La caída de voltaje por impedancia:

$$I_A Z_S = (22.4) \left(\sqrt{3^2 + 0.15^2} \right) = 67.2 \text{ V}$$

El diagrama fasorial correspondiente es el siguiente:

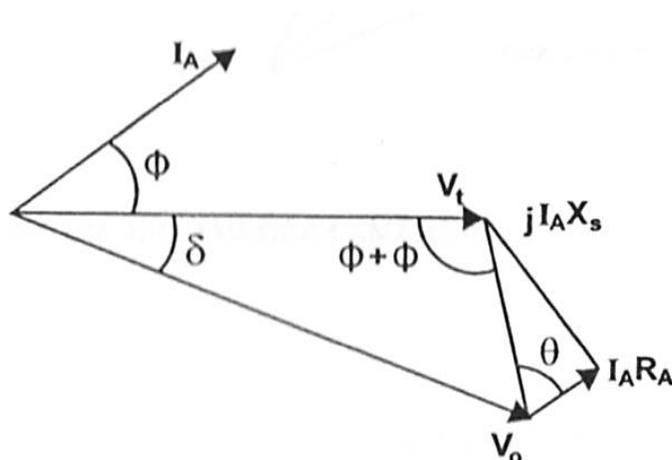


Figura. 7.4.12.

$$\Phi = \cos^{-1} 0.8 = 36.9^{\circ}; \quad \Phi = \tan^{-1} \frac{3}{0.15} = 87.13^{\circ}$$

Aplicando la ley de los cosenos en la figura anterior:

$$\begin{aligned} V_0^2 &= V_t^2 + (I_A Z_S)^2 - 2V_t(I_A Z_S) \cos(\Phi + \phi) \\ &= (231)^2 + (67.2)^2 - 2(231)(67.2) \cos. 124^{\circ} = 75237; \quad V_0 = 274 \text{ V} \end{aligned}$$

Sobre el mismo diagrama se aplica ahora la ley de los senos.

$$\text{sen } \delta = \frac{I_A Z_S}{V_0} \text{sen}(\Phi + \phi) = \frac{67.2}{274} \text{sen } 124^{\circ} = 0.203$$

$$\delta = \text{sen}^{-1}(0.203) = -11.7^{\circ}$$

b) De la característica de saturación dada en la figura anterior, para $V_0 = 274 \text{ V}$.
 $I_f = 9.2 \text{ A}$

c) La corriente mínima de armadura es:

$$I_A = \frac{P/3}{V_t} = \frac{12433/3}{231} = 17.94 \text{ A}$$

Con $\cos \Phi = 1$, de la curva de saturación, con $\theta = 90^{\circ}$ y $\phi = 0^{\circ}$ se tiene:

$$V_0^2 = V_t^2 + (I_A X_S)^2 = (231)^2 + (53.8)^2$$

$$V_0 = 237.2 \text{ V}, \text{ a este valor corresponde de la curva: } I_f = 6.2 \text{ A}$$

Flujo de potencia:

Como se ha observado de los diagramas fasoriales para un motor síncrono, el voltaje terminal V de la máquina esta adelantado a la fuerza electromotriz E_c y es independiente del factor de potencia al cual el motor opera, en el caso del generador el voltaje terminal

está atrasado con respecto a la FEM, tanto para motor como para el generador el factor de potencia se puede controlar ajustando a la corriente de excitación del campo.

Un generador cuando se aumenta el par del primomotor tiende a aumentar la velocidad y la FEM generada tiende a seguir el avance del rotor, esto se puede observar en la siguiente figura, el ángulo δ , conocido como ángulo de potencia o ángulo de par, es una medida de la potencia real entregada por la máquina. Es positivo cuando E_G se adelanta a V , es decir cuando el flujo de potencia sale de la máquina, si se aplica un par negativo, reduciendo el par en el primomotor con relación al valor requerido por la carga, entonces la red "jala" a la máquina, diciendo esto en otras palabras, la máquina actúa como motor y jala algo de la carga. En el caso que E_C este atrasado con respecto a V y el flujo resultante en el entrehierro entonces tiende a atrasar la posición del rotor, esto implica que el flujo fluye hacia la máquina, esta acción se predice cuando el ángulo δ es negativo.

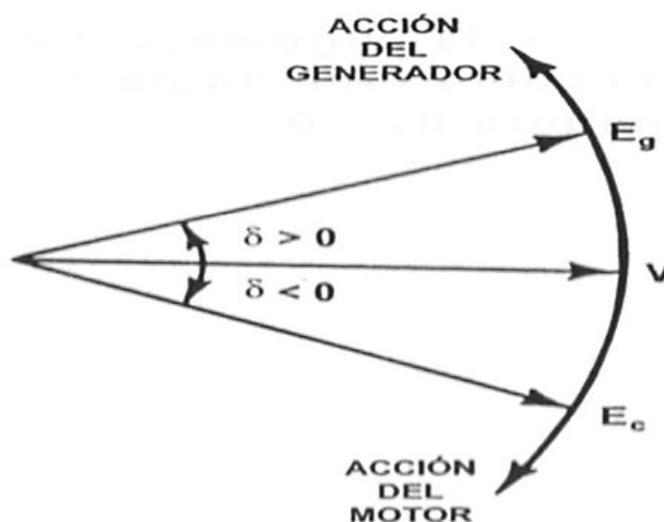
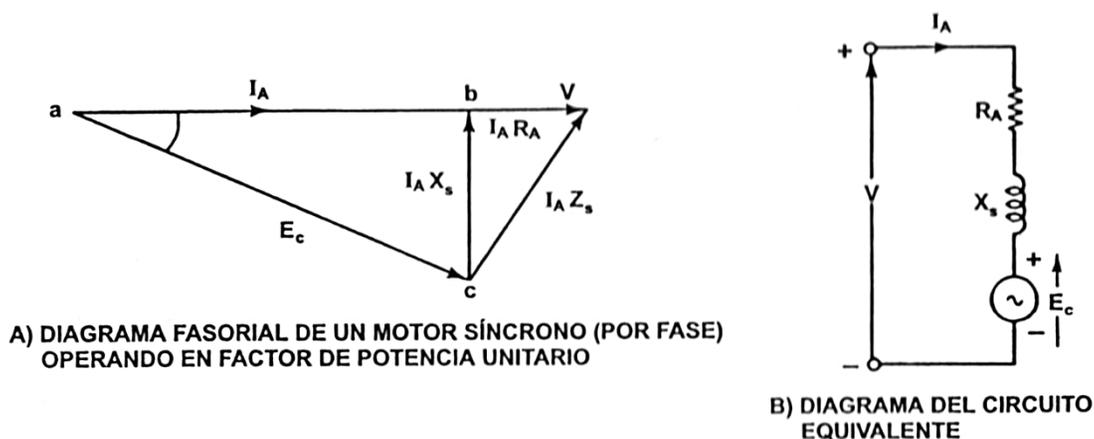


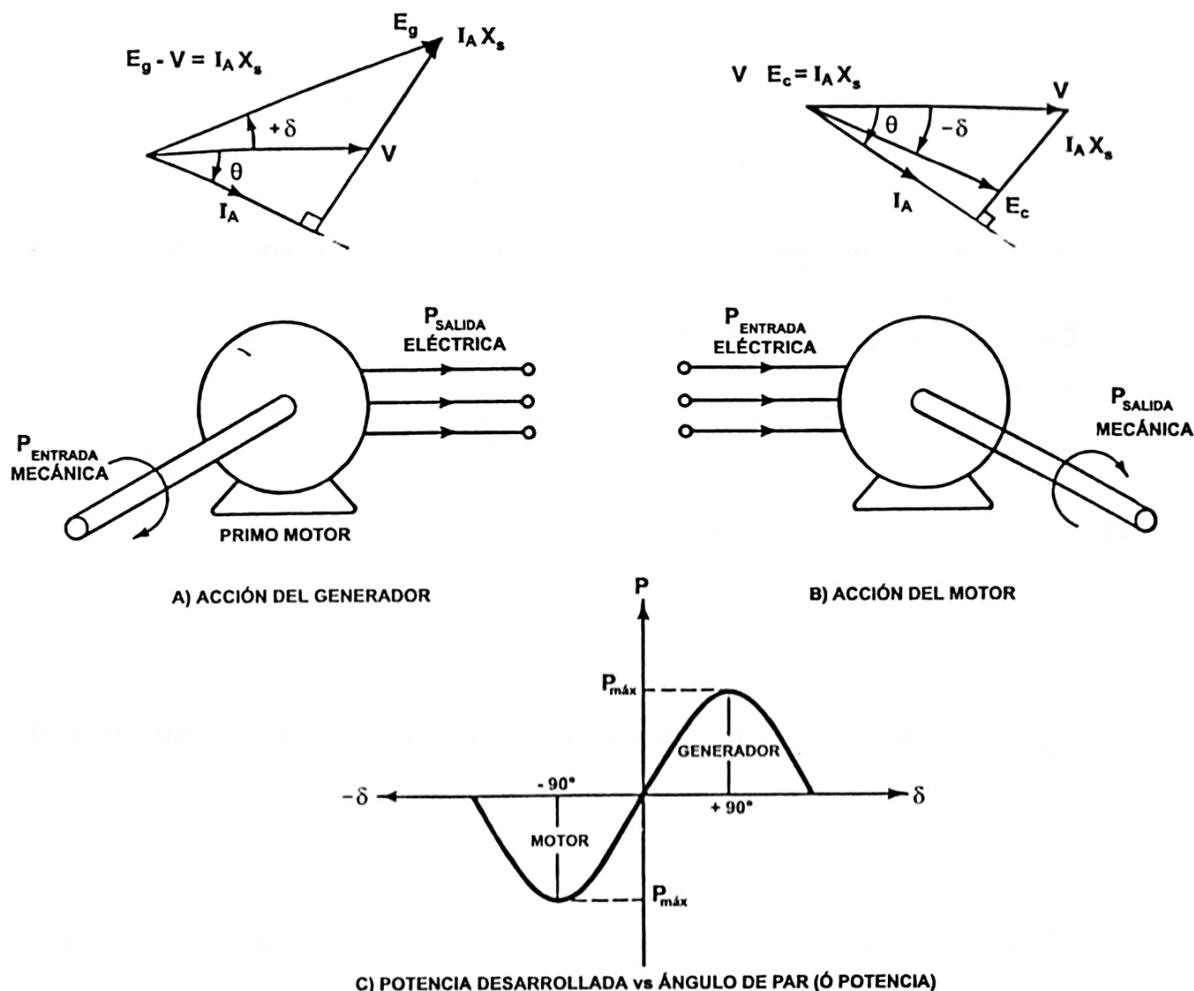
Figura. 7.4.13. Flujo de potencia en una máquina síncrona ($\delta > 0$ acción del generador, $\delta < 0$ acción del motor).



Figuras. 7.4.14. A) y B).

En la medida que se cambia la corriente de campo en cualquier condición de operación, no tiene lugar ningún cambio en la potencia real o el par entregado por el primomotor, podrá haber un cambio indirecto en la máquina, aumentando a un pequeño ajuste del ángulo de potencia, en la siguiente figura se hace un resumen de las diferencias entre la acción de generador o de motor.

Se puede considerar ahora una situación en donde el par sobre el motor se incrementa, bajo esta suposición la potencia desarrollada podrá alcanzar un valor máximo cuando $\delta = -90^\circ$ para un motor y $\delta = +90^\circ$ para un generador, en la siguiente figura en (c) se muestra la potencia desarrollada como función de δ , en esta curva se supone que la resistencia de armadura $R_A = 0$.



Figuras. 7.4.15. A), B) y C). Acción del generador y del motor de una máquina síncrona.

Si se incrementa el par más allá de este punto, se presenta una pérdida de sincronismo y el motor se frena.

$$P = \frac{E_C V}{X_S} \text{sen } \delta \text{ W/Fase}$$

La máxima potencia (P_{MAX}) ocurre cuando $\text{sen } \delta = 1.0$ ($\delta = 90^\circ$) es decir:

$$P_{MAX} = \frac{E_C V}{X_S} \text{sen } \delta \text{ W/Fase}$$

Estas expresiones parten de la suposición de que la resistencia de armadura es despreciable. La pérdida de sincronismo implica que el enlace magnético entre el rotor y el estator se ha perdido de las expresiones anteriores: Ángulo.

$P =$ Potencia mecánica del motor por fase [W].

$E_C =$ Voltaje inducido de línea a neutro (volts) por la corriente de excitación.

$V =$ Voltaje de línea a neutro de la fuente (volts).

$X_S =$ Reactancia síncrona por fase (Ω).

$\delta =$ Ángulo del par entre E_C y V (grados eléctricos).

Ángulos eléctricos y mecánicos:

En el caso de los generadores síncronos hay una relación entre el ángulo mecánico α , el ángulo del par δ y el número de polos P y está dada por la expresión:

$$\delta = \frac{P\alpha}{2}$$

Ejemplo:

Un motor síncrono trifásico conectado en estrella, tiene una reactancia síncrona $X_S = 2.6 \Omega/\text{fase}$, se supone que la resistencia de armadura $R_A = 0$, la potencia de entrada al motor es 820 KW, en tanto que la excitación del campo es tal que la fuerza contra electromotriz es 2800, calcular:

- El ángulo par.
- La corriente de línea y el factor de potencia.

Solución:

Para observar que sucede en forma cualitativa se puede construir un diagrama fasorial para lo cual se puede ver que para el motor síncrono V se adelanta a E_C y además E_C es mayor que V , resultando un factor de potencia adelantado.

Máquinas eléctricas.

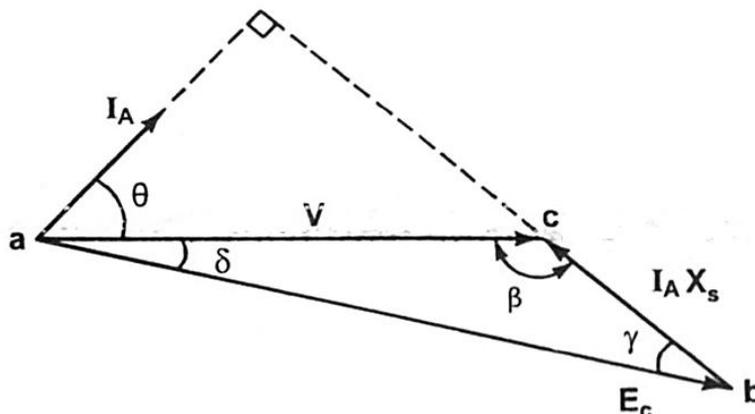


Diagrama fasorial para la solución del ejemplo.

- a) Como el circuito está conectado en estrella se tiene:

$$V = \frac{2200}{\sqrt{3}} = 1270 \text{ V/Fase}$$

También:

$$E_c = \frac{2800}{\sqrt{3}} = 1617 \text{ V/Fase}$$

De la ecuación de ángulo de potencia.

$$P = \frac{E_c V}{X_s} \text{ sen } \delta \text{ W/Fase}$$

P es potencia por fase, por lo que:

$$\frac{820000}{3} = \frac{1617 \times 1270}{2.6} \times \text{sen } \delta$$

O bien:

$$\text{sen } \delta = 0.346$$

$$\delta = \text{sen}^{-1} 0.346 = 20.2^\circ \text{ electricos}$$

- b) Para el cálculo del factor de potencia es necesario el ángulo θ , que se puede obtener a partir de la ecuación:

$$I_A \angle \theta = \frac{V \angle 0^\circ - E_c \angle -\delta}{jX_s}$$

$$I_A \angle \theta = \frac{1270 \angle 0^\circ - 1617 \angle -20.2^\circ}{j2.6}$$

$$I_A \angle \theta = 235 \angle 24^\circ$$

De aquí:

$$\theta = 24^\circ \text{ y se obtiene que } FP = \cos \theta = \cos 24^\circ = 0.914 \text{ (adelantado)}$$

Ejemplo:

Se tiene un motor síncrono trifásico de 600 KW, 4 kV, 180 RPM, 60 Hz que tiene una reactancia síncrona $X_s = 1.4 \Omega$ y la resistencia de armadura $R_A = 0$. Operando a plena

Máquinas eléctricas.

carga los polos del rotor se desplazan en ángulo mecánico de 1° con relación a su posición de operación en vacío. Si la excitación de línea a neutro es: $E_C = 2.2 \text{ kV}$, calcular la potencia mecánica desarrollada.

Solución:

Para 180 RPM y 60 Hz, el número de polos se calcula de:

$$f = \frac{PN}{120}; \quad P = \frac{120f}{N} = \frac{120 \times 60}{180} = 40$$

El par de ángulo del par es:

$$\delta = \frac{P\alpha}{2} = \frac{(40 \times 1^\circ)}{2} = 20^\circ$$

Como el motor está conectado en estrella, el voltaje V aplicado al motor es:

$$V = VL/\sqrt{3} = 4KV/\sqrt{3} = 2.3KV = 2300V$$

El voltaje de excitación es:

$$E_C = 2200V$$

La potencia mecánica desarrollada por fase es:

$$P = \frac{E_C V}{X_S} \text{ sen } \delta = \frac{2300 \times 2200}{1.4} \text{ sen } 20^\circ = 1236 \text{ KW}$$

La potencia trifásica total:

$$P = 3 \times 1236 = 3708 \text{ KW}$$

Como:

$$1HP = 0.746 \text{ KW} \therefore P = 4970.5 \text{ HP}$$

Eficiencia:

Para poder dejar completa la idea del flujo de potencia en un motor síncrono, se deben considerar las pérdidas que ocurren en un motor síncrono, como es de esperar esto es similar al caso del generador síncrono, en la siguiente figura se muestran las pérdidas que se tienen en un motor síncrono. Las pérdidas del motor restadas de la potencia de entrada dan la eficiencia, cuyo valor es generalmente del orden del 80% al 90%, las pérdidas se manifiestan como calor que se debe retirar del motor, como se puede observar, los números de la eficiencia pueden variar en forma amplia, dependiendo de que se considere, por ejemplo en ocasiones no se consideran las pérdidas, las pérdidas de excitación.

Para calcular la eficiencia se procede como en el caso de los generadores síncronos o bien de los motores de inducción.

Máquinas eléctricas.

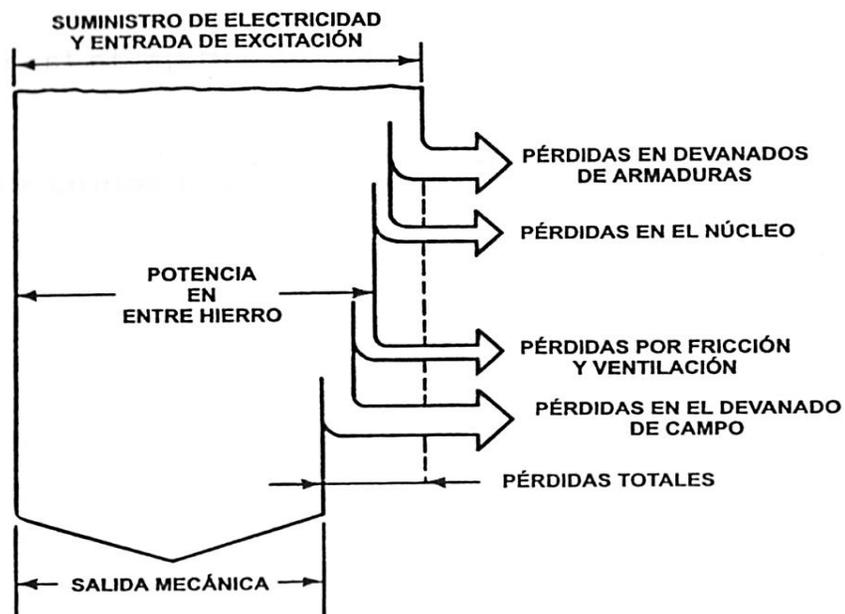


Figura. 7.4.16. Flujo de potencia para un motor síncrono.

La eficiencia se calcula entonces como:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{salida+perdidas}} \times 100$$

Dónde: P_{salida} = potencia de salida en el eje este valor es igual al par en el eje multiplicado por la velocidad radial a la cual es desarrollado.

$$P_{salida} = WT_{eje}(\text{Watts})$$

La potencia de entrada es simplemente:

$$P_e = \sqrt{3}V_{LL}I_L \cos \theta$$

La ecuación para la eficiencia se puede escribir también como:

$$\eta = \frac{WT_{eje}}{WT_{eje} + 3R_A I_A^2 + I_F V_F + P_{nucleo} + Pf + V} \times 100$$

Dónde:

V_F = Voltaje en el devando de campo (V).

I_F = Corriente que circula a traves del devanado de campo (A).

R_A = Resistencia del devanado de armadura.

I_A = Corriente a traves del devanado de armadura (A).

Máquinas eléctricas.

P_{NUCLEO} = Pérdidas en el núcleo (Watts).

P_{F+V} = Pérdidas por fricción y ventilación (Watts).

Si se excluyen las pérdidas en el circuito de excitación, la potencia de salida se puede escribir como:

$$P_{salida} = Pd - P_{f+V+NUCLEO} - P_{ro} + (Watts)$$

Ejemplo se tiene una máquina síncrona trifásica de 10 MVA, 6.6 kV conectada en estrella con una $R_A = 0.13 \Omega/Fase$ de la que se proporcionan los siguientes datos para las pruebas de cortocircuito y de circuito abierto.

Corriente de campo (A)	25	50	75	100	125	150	175	200	225
FEM de línea (V)	2.4	4.8	6.1	7.1	7.6	7.9	8.3	8.5	8.7
Corriente de cortocircuito (A)	288	582	875						

El motor alimenta una carga mecánica tal que la entrada con respecto al bus produce un retardo en el ángulo de 20° , el voltaje inducido o FEM por fase es 3417V., las condiciones de operación son las mostradas en la figura. Calcular la potencia de entrada al motor.

Solución:

En términos de motorización para una corriente positiva:

$$E_R = V - E \text{ Volts, por lo tanto}$$

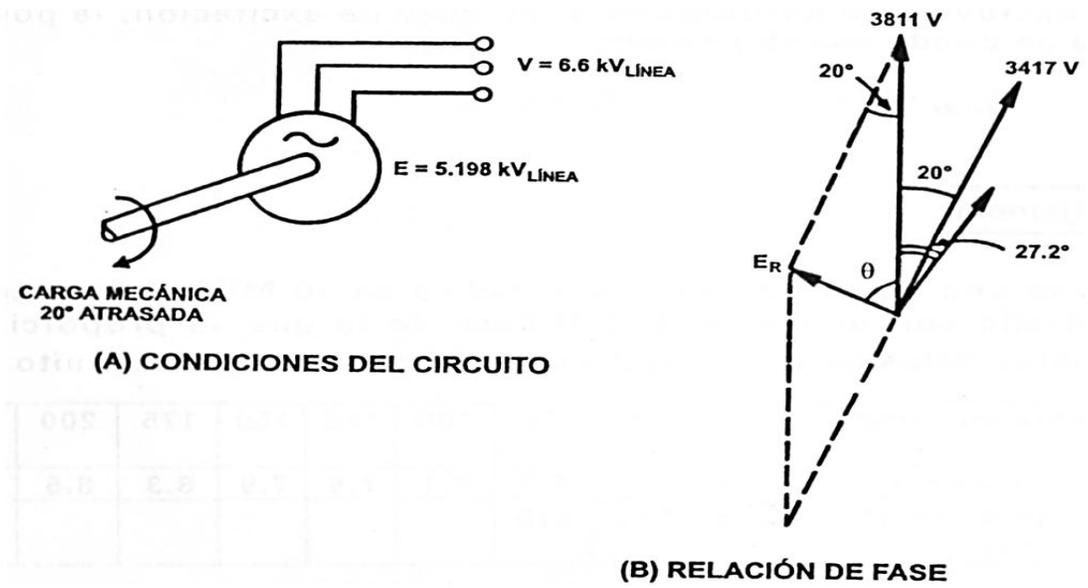
Dando:

$$E_R = 1314 \text{ V}$$

La corriente circulante es:

$$I = \frac{E_R}{Z_S} = \frac{1314}{4.02} = 326.9 \text{ A}$$

Esta corriente se retrasa 90°



Aplicando la ley de los senos:

$$\frac{E_R}{\text{sen } 20^\circ} = \frac{3417}{\text{sen } \theta}$$

$$\text{sen } \theta = \frac{3417 \text{ sen } 20^\circ}{E_R} = \frac{3417 \text{ sen } 20^\circ}{1314} = 0.8894$$

$$\theta = \text{sen}^{-1} 0.8894 = 62.8^\circ$$

El ángulo de la corriente con respecto al voltaje de fase es:

$$90^\circ - 62.8^\circ = 27.2^\circ$$

Por lo tanto, la potencia suministrada por la maquina síncrona es:

$$P = \frac{\sqrt{3} \times 6.6 \times 10^3 \times 326.9 \times \cos 27.2^\circ}{10^6} = 3.32 \text{ MW}$$

Ejemplo:

Se tiene un motor síncrono de 8 polos, 60 Hz, conexión delta que opera a 415V al que se le ajusta la corriente de excitación para que resulte una $FEM_{inducida}$ de 520V y un ángulo de par de 12° eléctricos. La impedancia de armadura $Z_s = 0.5 + j4.0 \Omega$, las pérdidas rotacionales son de 2000 W. calcular:

- La corriente de línea.
- El factor de potencia.
- La potencia de salida.
- La eficiencia.
- Los HP y par en el eje.

Solución:

El diagrama vectorial para los valores dados se muestra en la siguiente figura.

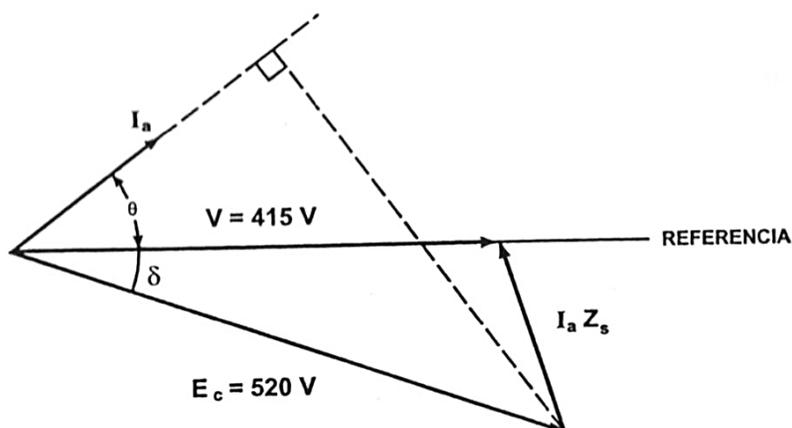


Diagrama fasorial para la solución del ejemplo en base a una fase.

Por inspección de este diagrama fasorial se tiene:

$$I_A Z_S = V \angle 0^\circ - E_C \angle -\delta = 415 - 520 \angle -12^\circ$$

$$= 415 - 1508.6 - j108.1 = 143.0 \angle 130.9^\circ V$$

También:

$$Z_S = 0.5 + j4.0 = 4.031 \angle 82.9^\circ \Omega$$

De aquí se tiene:

$$I_A = \frac{I_A Z_S}{Z_S} = \frac{143 \angle 130.9^\circ}{4.031 \angle 82.9^\circ} = 35.5 \angle 43^\circ A$$

a) La corriente de línea, usando los resultados anteriores:

$$I_L = \sqrt{3} I_A = \sqrt{3} \times 35.5 = 61.5 A$$

(Considerando que la armadura está conectada en delta).

b) El ángulo de la corriente de armadura es:

$$\theta = 48^\circ$$

Por lo tanto, el factor de potencia.

$$\cos \theta = \cos 48^\circ = 0.669 \text{ adelantado.}$$

c) La potencia de entrada se puede calcular como:

$$P_e = \sqrt{3} V_{LL} \cos \theta = 3 V I_A \cos \theta$$

$$= 3 \times 415 \times 35.5 \times 0.669 = 29573 W$$

Las pérdidas en el cobre de la armadura:

$$P_{CU} = 3 R_A I_A^2 = 3 \times 0.5 \times (35.5)^2 = 1890 W$$

La potencia desarrollada en el entrehierro es entonces:

$$P_d = P_e - P_{CU} = 3 E_C I_A \cos(\theta + \delta)$$

Máquinas eléctricas.

$$= 29,573 - 1890 = 27683W$$

La potencia de salida es:

$$P_S = P_d - P_{rot} = 27683 - 2000 = 25683W$$

d) La eficiencia es:

$$\eta = \frac{P_S}{P_e} \times 100 = \frac{25683}{29573} \times 100 = 86.8\%$$

e) Los HP desarrollados en el eje son:

$$HP = \frac{P_S}{746} = \frac{25683}{746} = 34.4$$

El par a la carga es:

$$T_{eje} = \frac{25683}{2\pi \times 900/60} = 273 N - m$$

Las curvas V de los motores síncronos:

Como se ha demostrado, el factor de potencia de un motor síncrono se puede controlar modificando la corriente de campo, de los ejemplos anteriores se ha estudiado que no solo cambia el factor de potencia, también se ve afectada. Bajo la suposición de una carga constante, la potencia de entrada al motor no cambia en forma apreciable y se puede suponer que permanece el mismo valor, por supuesto, cuando la corriente aumenta, las pérdidas en el cobre aumentan de alguna manera, así como las pérdidas en el núcleo debido a un ligero cambio en el flujo; sin embargo este incremento en las pérdidas no cambia la potencia de entrada demasiado. Para mostrar como la corriente de campo controla el factor de potencia, se considera una gran reducción en la excitación del campo, la cual a su vez reducirá la $FEM_{inducida}$ E_C y causa un atraso en la corriente de línea.

También, si se supone que el motor opera en vacío, aumentando la corriente de campo desde un valor pequeño, se observa que la corriente de línea se reduce hasta que se presenta la corriente mínima de línea, indicando que el motor está operando a factor de potencia unitario, hasta este punto, el motor estaba operando a factor de potencia atrasado, si se continúa con el incremento en la corriente de campo, la corriente de línea aumenta otra vez y el motor arranca para operar a factor de potencia adelantado, si se grafica la relación de corriente de armadura contra corriente de campo, se obtiene una figura como la siguiente y repitiendo este proceso a varios valores de carga incrementados para el motor, resulta una familia de curvas como se muestra. Debido a la forma resultante, estas curvas se conocen comúnmente como "curvas V".

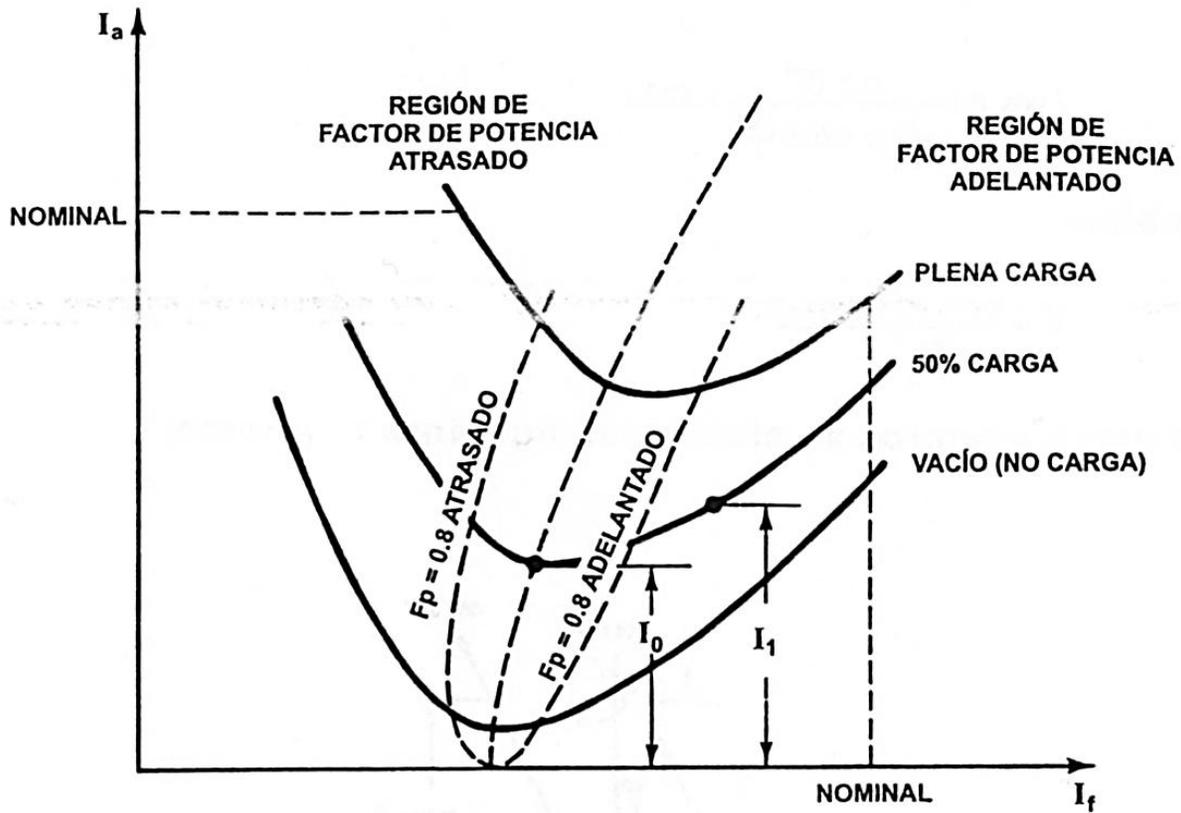


Figura. 7.4.17. Curvas síncronas de motor.

El punto en el cual el factor de potencia es la unidad, representa al punto en donde la corriente de armadura es mínima, esto está indicado por I_0 , por ejemplo, para la curva tomada cuando el motor síncrono entrega el 50% de su carga nominal. Conectando los puntos más bajos de todas las curvas V, resulta la curva de líneas discontinuas, indicada como "factor de potencia unitario" en la figura, a esta curva se le conoce también como "curva compuesta", se pueden dibujar otras para distintos valores de factor de potencia, como está indicado.

Tomando los datos necesarios durante esta prueba, se puede dibujar también el factor de potencia para cada punto y dibujando el factor de potencia contra la corriente de campo resulta una familia de curvas como las mostradas en la siguiente figura, las cuales son curvas V invertidas, el punto más alto sobre cada una de estas curvas indica factor de potencia unitario, estas muestran que si la excitación se ajusta a un cierto valor de carga para factor de potencia unitario, aumentando la carga, se obtiene un factor de potencia atrasado.

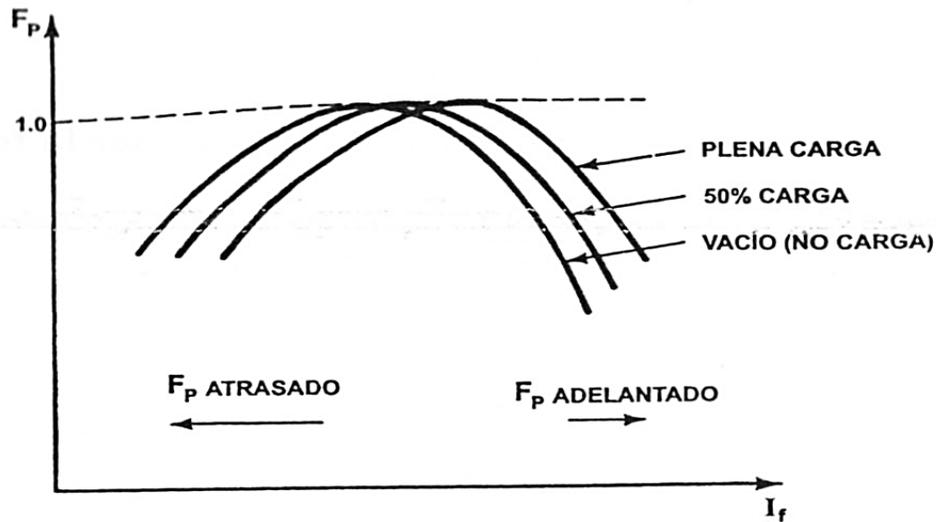


Figura. 7.4.18. Factor de potencia contar corriente de campo a distintas cargas.

Estas curvas de factor de potencia (FP) se pueden construir también de las curvas V, refiriéndose otra vez a la curva de 50% de corriente nominal o carga, si se hace I_1 , el valor de la corriente de armadura a algún factor de potencia θ , la potencia por fase es:

$$P = VI_1 \cos \theta = \frac{1}{2} - \text{carga}$$

$$I_1 \cos \theta = I_o$$

Para todos los valores de θ , dado que la potencia entregada por la máquina para esta curva es constante.

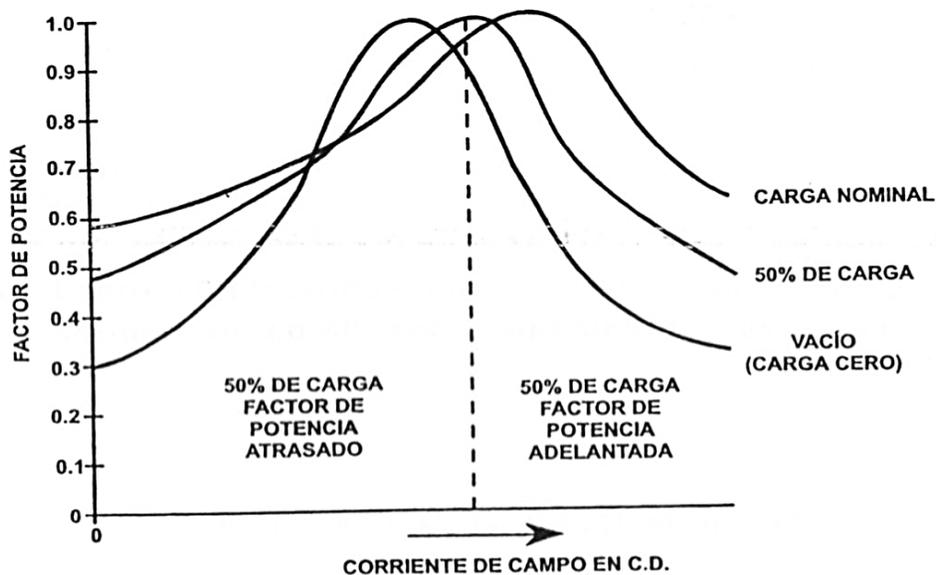


Figura. 7.4.19. A) Factor de potencia corriente de campo.

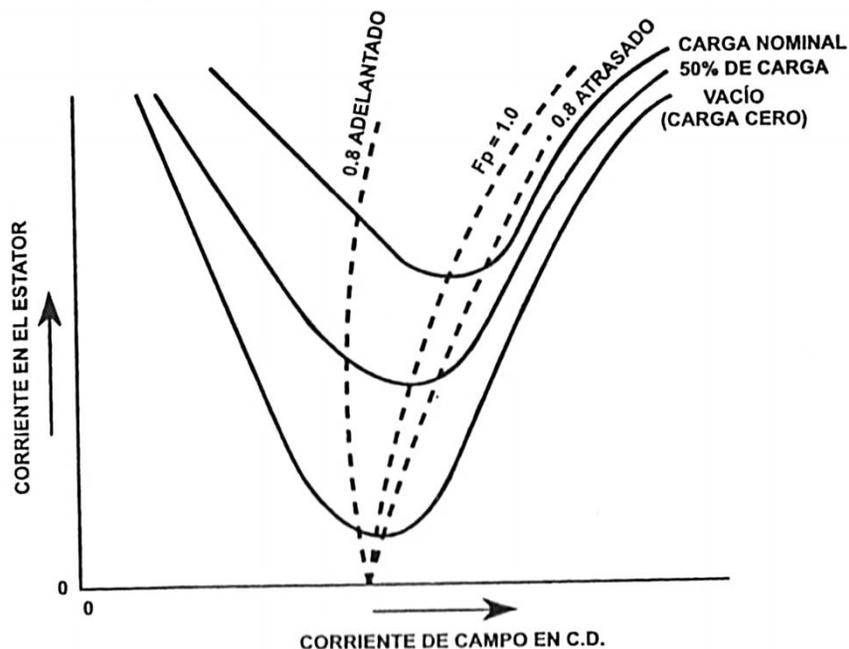


Figura. 7.4.20. B) Corriente en el estator contra corriente de campo.

La excitación correspondiente al valor de corriente de armadura I_0 se le denomina la excitación normal. Si se reduce esta excitación, el motor demanda una corriente atrasada y se dice que esta subexcitado. Si se aumenta la excitación, entonces la corriente resultante es adelantada y se dice que esta sobreexcitado, por lo tanto el factor de potencia $\cos \theta = I_o/I_1$ se puede encontrar para cualquier valor de corriente de armadura se puede leer de la curva, obteniéndose los datos necesarios para graficar las curvas.

Ejemplo:

Un motor síncrono trifásico de 125HP, 460V, 60 Hz, 1200 RPM tiene los siguientes parámetros de su circuito equivalente:

$$R_A = 0.078\Omega, \quad X_{A\ell} = 0.15\Omega, \quad X_{Ar} = 1.85\Omega \quad N_{re}/N_{se} = 28.2$$

Para las condiciones nominales, la corriente de campo se ajusta para hacer el factor de potencia del motor, la unidad. Despreciando todas las pérdidas rotacionales y las pérdidas en el devanado de campo.

- a) Para las condiciones de operación nominales, calcular la corriente del motor I_A , la corriente de campo I_F y el ángulo de potencia δ .
- b) Dibujar el diagrama fasorial.
- a) Para las condiciones nominales.

$$Pe = \sqrt{3} \times 460 \times I_A = 3R_A I_A^2 + 125 \times 746$$

$$\sqrt{3} \times 460 \times I_A = 3 \times 0.078 I_A^2 + 125 \times 746$$

$$7961 I_A = 0.2341 I_A^2 + 93250$$

Ordenando términos:

$$0.234I_A^2 - 796I_A + 93250 = 0$$

Resolviendo la ecuación de segundo grado por la fórmula general.

$$I_A = \frac{-(-796) \pm \sqrt{(796)^2 - 4(0.234)(93250)}}{2(0.234)} = 121.8A$$

Haciendo:

$$V_t = \frac{460}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 265.6 \angle 0^\circ$$

$$I_A = 121.8 \angle 0^\circ$$

$$E_C = V_t - I_A R_A$$

$$= 256 \angle 0^\circ - 121.8 \angle 0^\circ \times 0.078$$

$$E_C = 256.13 \angle 0^\circ V$$

La reactancia síncrona:

$$X_S = X_{A\ell} + X_{AR} = 0.15 + 1.85 = 2.0 \Omega$$

$$I_M = \frac{256.13 \angle 0^\circ}{2.0 \angle 90^\circ} = 128.06 \angle -90^\circ A$$

$$I'_F = I_M - I_A = 134.74 \angle -90^\circ - 128.06 \angle 0^\circ$$

$$I'_F = 181.4 \angle 132^\circ$$

$$\beta = -132^\circ$$

También:

$$\eta = \frac{\sqrt{2}}{3} \times 28.2 = 13.29$$

Dónde:

N_{re} = Número de espiras efectivas del devanado de campo.

N_{se} = Número efectivo de espiras por fase del estator.

También:

$$I'_F = \frac{X_{AR}}{X_S} \eta I_f$$

$$I'_F = \frac{181.4}{13.29} = \frac{1.9}{1.85} = 14.02A$$

$$\delta = -132^\circ + 90^\circ = -42^\circ$$

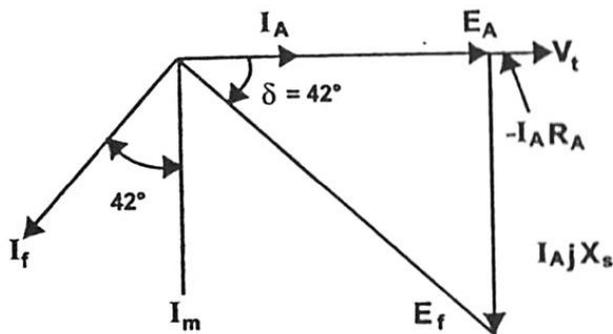


Diagrama fasorial del ejemplo.

7.5. Aplicaciones:

Los motores síncronos son usados como servo-controladores en aplicaciones como equipos periféricos de computadoras, robóticos y como controladores de velocidad ajustables en una variedad de aplicaciones como: bombas de carga proporcional, grandes abanicos y compresores.

Debido a sus características son utilizados prácticamente en todos los segmentos de la industria tales como:

- Minería.
- Siderurgia.
- Papel y celulosa.
- Saneamiento.
- Química y petroquímica.
- Cemento.

7.6 Material didáctico*:

1. <http://www.tuveras.com/maquinasca/maquinasca.htm>
2. <http://www.tuveras.com/acoplamiento/acoplamiento.htm>
3. <http://www.tuveras.com/motorsincrono/motorsincrono.htm>
4. <http://prezi.com/ey2yqiotfv5o/aplicaciones-de-los-motores-ac-sincronos/>

Conclusiones:

La realización de este trabajo ha sido para apoyar y/o complementar los temas del plan de estudios 2012 de la materia de máquinas eléctricas del módulo industrial; dando a conocer algunos ejercicios, material audio/visual y el uso de software para que estos temas puedan ser mejor entendidos o para ampliar más sus conocimientos sobre los mismos y así se puedan tomar como futuras referencias el uso del material didáctico que se está dando a conocer.

Al realizar este trabajo espero dar un material de consulta a mis compañeros para que les quede más claro el tema de las maquinas eléctricas y puedan apoyarse para una consulta y referencia sobre la materia.

BIBLIOGRAFIA:

a) Libros:

- Enríquez Harper Gilberto.
El libro practico de los generadores, transformadores y motores eléctricos.
México, editorial. Limusa, 2004.
252 páginas. Con ilustraciones.
- Enríquez Harper Gilberto.
Curso de transformadores y motores de inducción.
4ª edición
México, editorial. Limusa, 2006.
575 páginas. Con ilustraciones.
- Wildi Theodore.
Maquinas eléctricas y sistemas de potencia.
Sexta edición.
Editorial Pearson Educación, México, 2007.
- Enríquez Harper Gilberto.
Maquinas eléctricas.
México, editorial. Limusa 2005.
218 paginas, con ilustraciones.
- Manual eléctrico viakon (conductores monterrey).
- Software del catálogo electrónico de motores eléctricos WEG.
- Software del motor eléctrico MIT.

b) Páginas web:

- <http://cona177fzayalumbrado.blogspot.mx/2010/11/partes-del-motor-universal.html>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_monof%C3%A1sico_universal
- <http://cona177fzayalumbrado.blogspot.mx/2010/11/partes-del-motor-universal.html>
- <http://profesorivo.wordpress.com/educacion-para-el-trabajo/>
- <http://www.monografias.com/trabajos36/maquinas-electricas/maquinas-electricas2.shtml>
- <http://www.tuveras.com/motorsincrono/motorsincrono.htm>
- http://joladisruizperez.blogspot.mx/2012_08_01_archive.html
- <http://www.azimadli.com/vibman-spanish/motoresainduccin.htm>
- <http://electronicki.wikispaces.com/Los+Motores+S%C3%ADncronos>
- <http://www.inducor.com.ar/academicos/calculo-de-maquinas-electricas/maquinas-electricas-apendice16.html>
- http://www.unicrom.com/Tut_principio_funcionamiento_transformador_potencia.asp
- http://html.rincondelvago.com/transformadores_3.html
- <http://www.nichese.com/imped-trans1.html>

- <http://www.monografias.com/trabajos93/los-autotransformadores/los-autotransformadores.shtml>
- <http://www.tuveras.com/maquinascc/dinamo/excitaciondinamo.htm>
- http://www.unicrom.com/Tut_GeneradorCC.asp
- <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-sincronicos-50027895-catalogo-espanol.pdf>
- <http://html.rincondelvago.com/motor-sincronico.html>
- <http://prezi.com/ey2yqiotfv5o/aplicaciones-de-los-motores-ac-sincronicos/>
- <http://generadoresdeca.blogspot.mx/>
- <http://mecnica.umsa.edu.bo/Libros/Lea3.pdf>
- http://www.walter-fendt.de/ph14s/generator_s.htm
- <http://ocw.unican.es/enseanzas-tecnicas/centrales-de-generacion-de-energia-electrica/materiales/bloque-energia-II.pdf>
- http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/87411/WEG-Generadores_sincronicos.pdf
- <http://html.rincondelvago.com/generadores-sincronicos.html>
- <http://www.tuveras.com/transformador/previos.htm>
- <http://www.aulaelectronica.es/>
- <http://www.youtube.com/watch?v=WNXRLPUNAU>
- <http://www.youtube.com/watch?v=TsAZrzfH-OU>
- <http://www.youtube.com/watch?v=M4jMkdTFOs>
- <http://www.tuveras.com/maquinaselectricas.htm>
- <http://www.tuveras.com/transformador/previos.htm>
- http://www.tuveras.com/transformador/eltransformador_ideal.htm
- http://www.tuveras.com/transformador/eltransformador_real.htm
- http://www.tuveras.com/transformador/transformador_ensayos.htm
- http://www.tuveras.com/transformador/eltransformador_potencias.htm
- <http://www.tuveras.com/transformador/reduccion.htm>
- <http://www.tuveras.com/transformador/autotransformador.htm>
- <http://www.tuveras.com/eltrafotrifasico/eltrafotrifasico.htm>
- http://www.tuveras.com/eltrafotrifasico/autotransformador_trifasico.htm
- <http://www.tuveras.com/eltrafotrifasico/acoplamiento.htm>
- <http://www.youtube.com/watch?v=O1rkRMrR0eg>
- <http://www.youtube.com/watch?v=WNXRLPUNAU>
- <http://www.youtube.com/watch?v=TsAZrzfH-OU>
- <http://www.youtube.com/watch?v=M4jMkdTFOs>
- <http://www.tuveras.com/maquinasca/maquinasca.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono1.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono2.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono3.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono4.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono5.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono6.htm>

- <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono7.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono9.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinascc/conceptosprevios.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinascc/estructura.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinascc/dinamo/reaccion.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinascc/motor/motor.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinascc/motor/excitacionmotor.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinascc/funcionamientos.html>
- <http://www.tuveras.com/maquinascc/estructura.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinascc/dinamo/excitaciondinamo.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinascc/dinamo/reaccion.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinascc/dinamo/dinamo.htm>
- <http://www.tuveras.com/maquinascc/funcionamientos.html>
- <http://www.tuveras.com/maquinasca/maquinasca.htm>
- <http://www.tuveras.com/alternador/alternador.htm>
- <http://www.tuveras.com/acoplamiento/acoplamiento.htm>
- <http://smartdreams.cl/motor-de-corriente-continua/>
- <http://www.aulamois.com/software-mois/gestion-de-ensayos-el>
- <http://www.tuveras.com/motorsincrono/motorsincrono.htm>
- <http://www.tuveras.com/acoplamiento/acoplamiento.htm>
- <http://www.monografias.com/trabajos93/motores-electricos/motores-electricos.shtml>
- <http://www.tuveras.com/maquinaelectricas.htm>
- <http://electricidad-ibf.blogspot.mx/p/el-transformador.html>
- <http://www.youtube.com/watch?v=Vg06lUci05w>