

**GODOFREDO BARRANTES ZAPANA**

**ID: UB3202SEE7842**

**FASE II**

**DESARROLLO ASIGNATURA PENSUM:**

**3. ELECTRICITY MACHINES**

**ATLANTIC INTERNATIONAL UNIVERSITY**  
**Honolulu, Hawaii**

**ENERO 2007**

## 1. TABLA DE CONTENIDO

1. Tabla de contenido.....	2
2. Introducción.....	3
3. Descripción.....	4
3.1 Introducción a los principios de las maquinas eléctricas.....	5
3.2 Transformadores.....	14
3.3 Fundamentos de maquinas eléctricas .....	16
3.4 Generadores de C.C.....	18
3.5 Motores de C.C.....	20
3.6 Fundamentos de maquinas de C.A. ....	22
3.7 Generadores sincrónicos.....	26
3.8 Motores sincrónicos.....	30
3.9 Motores de inducción.....	32
4. Conclusión.....	37
5. Bibliografía.....	41

## 2. INTRODUCCION

En la historia del desarrollo de la humanidad se han buscado muchas fuentes de energía para movilizarse, construir viviendas, arar, segar, procesar los alimentos e iluminar. Hombres y bestias fueron las primeras fuentes de energía, incluso la esclavitud fue ampliamente justificada durante milenios con esta finalidad. La leña y el carbón desempeñaron un papel protagónico durante la revolución industrial, con la invención de la máquina de vapor. El desarrollo de la electricidad a finales del siglo XIX permitió el desarrollo de la industria moderna y requirió la conversión de diversas fuentes de energía en energía eléctrica y viceversa. En la actualidad el desarrollo de la electrónica y en especial de la electrónica de potencia, permite el control efectivo y eficiente de los procesos de conversión de energía eléctrica.

Una maquina eléctrica es un artefacto que puede convertir bien sea energía eléctrica en energía mecánica o bien energía mecánica en energía eléctrica. Cuando tal artefacto se utiliza para convertir energía mecánica en energía eléctrica se le denomina **generador**. Cuando convierte en energía eléctrica en energía mecánica se llama **motor**. Como cualquier maquina eléctrica dada es capaz de convertir potencia en ambos sentidos, toda maquina puede utilizarse, ya sea como generador o como motor. Casi todos los motores prácticos y generadores convierten energía de una forma en otra por la acción de un campo magnético.

Otro artefacto íntimamente relacionado con los anteriores es el transformador. Un transformador es el aparato que convierte energía eléctrica de c.a. de un nivel de voltaje dado, en energía eléctrica de c.a. a otro nivel de voltaje; puesto que los transformadores operan bajo los mismos principios de los generadores y motores eléctricos, dependiendo de la acción de un campo magnético para lograr el cambio de nivel de voltaje.

El propósito del presente trabajo es investigar y familiarizarse con las leyes físicas que rigen para la operación de las maquinas eléctricas, identificar los parámetros principales y sus respectivas unidades, revisar los conceptos y leyes fundamentales utilizadas como herramientas básicas en la solución de problemas de las maquinas eléctricas.

### 3. DESCRIPCION

En el presente trabajo, se describen los fundamentos de maquinas eléctricas, como el principio de funcionamiento, circuitos equivalentes, forma constructiva y características de las maquinas eléctricas estáticas y rotativas:

Transformadores, generadores de corriente continua, motores de corriente continua, generadores sincrónicos, motores sincrónicos y motores de inducción.

En la actualidad el transformador de potencia conjuntamente con el generador sincrónico y las líneas de transmisión, es uno de los componentes más importantes de los sistemas eléctricos de potencia. Su trabajo es función de los diferentes requerimientos por parte de la generación, de la transmisión o distribución; en la mayor parte sirve para reducir o elevar la tensión. Debido a que la potencia eléctrica es proporcional al producto de la tensión y la corriente; para un nivel de potencia especificado se pueden mantener bajos niveles de corriente y elevados niveles de tensión con la ayuda de un transformador.

De la misma forma, se pueden obtener bajos niveles de tensión y elevados niveles de corriente. Cabe indicar que el transformador es uno de los elementos más eficientes del sistema de potencia, como consecuencia de ello, el desarrollo de los sistemas de potencia modernos se ha reflejado en los avances en el diseño de transformadores. Esto también, ha dado como resultado una amplia variedad de transformadores desde unos pocos KVA hasta varios cientos de MVA que están disponibles para su uso en una amplia variedad de aplicaciones.

Los motores de inducción cumplen un papel muy importante en la industria, las razones fundamentales que justifican la aplicación masiva de esta máquina hoy en día, residen en su sencillez constructiva y en la robustez que ofrece estos convertidores durante la operación en regímenes de alta sollicitación. Estos motores requieren un mantenimiento mínimo, pueden operar convenientemente en ambientes peligrosos y tienen una tasa de falla muy reducida. Algunas limitaciones tales como el ajuste de la característica par-velocidad, la intensidad de las corrientes durante el arranque, la regulación de velocidad y el rendimiento han sido resueltas o mejoradas con diseños ingeniosos o incorporando controladores electrónicos de potencia.

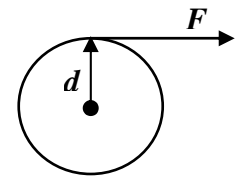
Las maquinas de corriente continua están en desuso debido a su complejo mantenimiento y costo de operación elevado; paulatinamente en la industria son reemplazados por motores de inducción trifásicos en combinación con variadores de frecuencia.

### 3.1 INTRODUCCION A LOS PRINCIPIOS DE MAQUINAS ELECTRICAS

Para tener una idea completa de la tecnología de potencia eléctrica, es esencial tener conocimiento de los siguientes conceptos:

**Fuerza.-** La magnitud de la fuerza de la gravedad depende de la masa de un cuerpo, y esta dada por la ecuación aproximada  $F = 9.8m$ . Donde  $F$  es fuerza de la gravedad que actúa sobre el cuerpo en [N],  $m$  es la masa del cuerpo en [Kg] y 9.8 es la constante aproximada que se aplica cuando los objetos están relativamente cerca de la superficie de la tierra (dentro de 30 Km).

**Par o momento de torsión.-** El momento de torsión o par se produce cuando una fuerza ejerce una acción de torsión sobre un cuerpo, la cual tiende a hacerlo girar, es igual al producto de la fuerza por la distancia perpendicular entre el eje de rotación y el punto de aplicación de la fuerza  $T = F \cdot d$



Donde:  $T$  = momento de torsión [N·m]  
 $F$  = fuerza [N]  
 $d$  = distancia perpendicular [m]

**Trabajo mecánico.-** Se realiza trabajo mecánico cuando una fuerza  $F$  se desplaza una distancia  $d$  en la dirección de la fuerza. El trabajo esta dado por  $W = F \cdot d$

Donde:  $W$  = trabajo [J]  
 $F$  = fuerza [N]  
 $d$  = distancia recorrida por la fuerza[m]

**Potencia.-** Es la capacidad normal de hacer trabajo, o el incremento de trabajo por unidad de tiempo  $P = dW/dt$ .

Donde:  $P$  = potencia [W]  
 $W$  = trabajo realizado [J]  
 $t$  = tiempo en el que se realiza el trabajo [s]

Potencia de un motor es la rapidez con que el motor convierte la potencia eléctrica en potencia mecánica.

La potencia eléctrica absorbida por el motor se expresa en vatios (W).

La potencia entregada por el motor al eje se expresa en HP o Vatios.

$$P(Hp) = \frac{T(Lb - pie) \cdot n(rev/min)}{5250}$$

$$P(W) = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot T(N - m) \cdot n(rev/min) = \frac{T \cdot n}{9.55}$$

**Energía.-** Es la capacidad que tiene todo cuerpo o sistema de realizar trabajo. Emplea las mismas unidades que el trabajo, el Joule (J).

Joule = N . m  
 Newton (N).  
 Metro (m).

**Eficiencia.-** La potencia activa absorbida, se convierte en su mayor parte en potencia mecánica, mientras que la potencia restante se pierde en forma de calor. Eficiencia de un motor es la relación entre potencia de salida y la potencia de entrada.

$$\eta = \frac{\text{Potencia mecánica}}{\text{Potencia eléctrica}}$$

**Inducción magnética o densidad de flujo magnético.-** Es la cantidad de flujo de campo magnético concentrado en un área determinado. En un conductor de corriente se producen efectos muy semejantes a los existentes en la vecindad de un imán permanente, se considera que la proximidad del conductor posee un campo de fuerzas, la densidad de las líneas es mayor cerca del conductor.

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

**Fuerza magnetomotriz.-** Es la capacidad de producción de flujo en un circuito magnético, es proporcional al número de espiras  $N$  y a la corriente  $I$ , midiéndose por la fuerza magnetomotriz (f.m.m en abreviatura). También se puede interpretar como la cantidad de fuerza del campo magnético "empuje". Análogamente es comparable con el voltaje eléctrico (fuerza electromotriz).

$$\mathfrak{S} = NI \quad \text{amperios} - \text{vuelta}$$

**Flujo magnético.-** Es la cantidad total de líneas de fuerza que atraviesa una superficie. Análogamente es comparable con la corriente eléctrica.

$$\Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int_A B_{\perp} \cdot dA = [\text{Weber}] \quad \Phi = \frac{\mathfrak{S}}{\mathfrak{R}} \quad \text{weber}$$

**Intensidad de campo magnético.-** Es la razón de la fuerza magnetomotriz (f.m.m.) por una unidad de longitud ( $l$ ), siendo el núcleo constante a lo largo del camino de flujo; magnitud que se conoce también como *fuerza magnetizante*, donde  $l$  es la longitud en metros.

$$H = \frac{\mathfrak{S}}{l} \quad [\text{amp} - \text{vuelta} / \text{m}]$$

**Reluctancia.-** La reluctancia de un circuito magnético es inversamente proporcional a su permeabilidad. Así como en el caso de los circuitos eléctricos, donde la corriente fluye con mayor facilidad por los caminos de menor resistencia, en los circuitos magnéticos el flujo magnético "fluye" con mayor facilidad por los caminos de menor reluctancia, de manera que las líneas de flujo se concentran en

las partes del circuito de mayor permeabilidad; sus unidades son Amperio-vuelta/weber.

$$\mathfrak{R} = \frac{\ell}{\mu \cdot S}$$

**Permeabilidad.-** Es una constante de proporcionalidad  $\mu$  es la permeabilidad del medio a través del cual pasan las líneas de flujo, la permeabilidad de un medio puede definirse como la medida de la capacidad para establecer líneas de flujo magnético. Cuanto más grande sea la permeabilidad del medio, mayor será el número de líneas de flujo que pasarán por la unidad de área.

La permeabilidad del espacio libre (el vacío) se denota mediante  $\mu_0$ .

Los materiales magnéticos se clasifican conforme a sus permeabilidades comparadas con la del espacio vacío.

La razón de la permeabilidad de un material con la correspondiente para el vacío

se llama permeabilidad relativa y está expresada por,  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ .

**Ley de Ampere.-** La ley básica que rige la producción de campo magnético por medio de una corriente es la ley de Ampere. Nos permite calcular el campo magnético producido por una distribución de corrientes cuando tienen cierta simetría.

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_c \quad C: \text{cualquier curva cerrada}$$

**Ley de Faraday.-** Un flujo variable produce una fem inducida en una espira, el valor del voltaje inducido es proporcional a la velocidad de cambio del flujo.

$$\varepsilon = N \frac{d\Phi}{dt}$$

**Fuerza de Lorentz.-** Cuando un conductor que transporta corriente se coloca en un campo magnético, se somete a una fuerza llamada *fuerza electromagnética* o fuerza de Lorentz. Esta fuerza es de fundamental importancia porque constituye la base de operación de motores, generadores y de muchos instrumentos eléctricos. La fuerza máxima que actúa en un conductor recto esta dada por,  $F = B \cdot l \cdot I$

Donde:  $F$  = fuerza que actúa en el conductor [N]

$B$  = densidad de flujo del campo [T]

$l$  = longitud activa del conductor [m]

$I$  = corriente en el conductor [A]

### 3.2 TRANSFORMADOR

**Introducción.**- Por definición, un transformador es un aparato en el cual dos o más circuitos eléctricos estacionarios están acoplados magnéticamente, estando encadenado el embobinado por un flujo magnético común que varía con el tiempo. Uno de estos embobinados, conocido como *primario*, recibe potencia a un voltaje dado desde la fuente y el otro embobinado, conocido como *secundario*, suministra potencia, usualmente a un voltaje diferente a la carga.

En un sistema eléctrico, la energía es generada en rangos de tensiones de 12 a 25 [kV], luego se eleva a 66 o 110kV para poder transmitirla a grandes distancias con bajas pérdidas en las líneas, posteriormente los transformadores bajan el voltaje hasta un rango de 12 a 25 [kV] para la distribución local y finalmente permiten el uso de la energía a voltajes domiciliarios. Por lo tanto, el propósito de los transformadores es cambiar de un nivel de tensión a otro según se requiera.

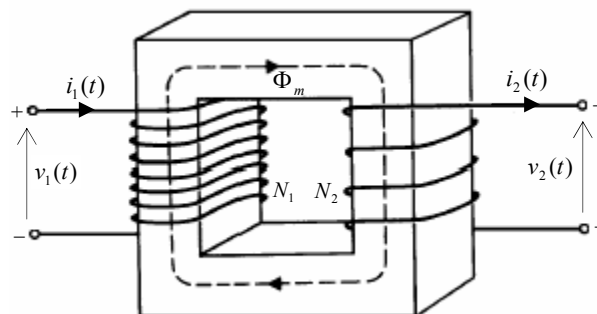
**Principio de funcionamiento.**- De la teoría electromagnética se sabe que cuando se hace circular una corriente alterna por una bobina se produce un flujo magnético variable el que a su vez induce un voltaje en los terminales de la misma. En los transformadores, el campo magnético se hace circular por un núcleo de hierro laminado, el cual es fácilmente magnetizable. Si en ese núcleo se enrolla otra bobina, el campo magnético encerrado por la segunda bobina induce una tensión en los terminales de ésta. Dicha tensión es proporcional al número de vueltas de la bobina.

#### El transformador ideal

Un transformador ideal es una máquina sin pérdidas, con una bobina de entrada y una bobina de salida. Las relaciones entre las tensiones de entrada y de salida, y entre la intensidad de entrada y de salida, se establece mediante dos ecuaciones sencillas.

**Un transformador ideal tiene las siguientes características:**

- La reluctancia del circuito magnético es nula.
- La resistencia de las bobinas son nulas.
- Las pérdidas en el hierro son nulas.
- Las fugas magnéticas son nulas.





El transformador tiene  $N_p$  espiras de alambre sobre su lado primario y  $N_s$  de espiras de alambre en su lado secundario. La relación entre la tensión  $v_p(t)$  aplicada al lado primario del transformador y la tensión  $v_s(t)$  inducido sobre su lado secundario es:

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

En donde  $a$  se define como la relación de espiras del transformador ó relación de transformación.

La relación entre la corriente  $i_p(t)$  que fluye en el lado primario del transformador y la corriente  $i_s(t)$  que fluye hacia fuera del lado secundario del transformador es

$$N_1 \cdot i_1(t) = N_2 \cdot i_2(t) \quad \text{ó} \quad \frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{1}{a}$$

En términos de cantidades fasoriales, estas ecuaciones son:

$$\frac{V_1}{V_2} = a \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{a}$$

Nótese que el ángulo de la fase de  $V_p$  es el mismo que el ángulo de  $V_s$  y la fase del ángulo  $I_p$  es la misma que la fase del ángulo de  $I_s$ . La relación de espiras del transformador ideal afecta las magnitudes de las tensiones e intensidades, pero no sus ángulos.

**Potencia en un transformador ideal.**- La potencia suministrada al transformador por el circuito primario se expresa por medio de la ecuación

$$P_{ent} = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$$

La potencia que el circuito secundario suministra a sus cargas se establece por la ecuación:

$$P_{sal} = V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi$$

Puesto que los ángulos entre la tensión y la intensidad no se afectan en un transformador ideal, las bobinas primaria y secundaria de un transformador ideal tienen el mismo factor de potencia.

La potencia de salida de un transformador ideal es igual a su potencia de entrada. La misma relación se aplica a la potencia reactiva  $Q$  y la potencia aparente  $S$  :

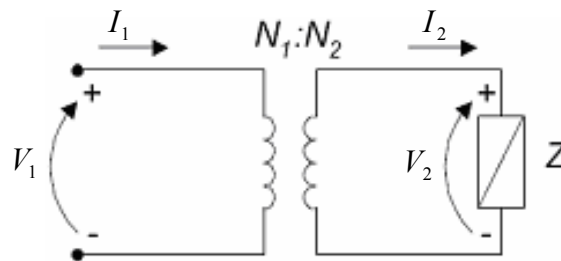
$$Q_{ent} = V_1 \cdot I_1 \cdot \text{sen}\varphi = V_2 \cdot I_2 \cdot \text{sen}\varphi = Q_{sal} \quad S_{ent} = V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 = S_{sal}$$

### Transformación de la impedancia por medio de un transformador

La impedancia de un artefacto o un elemento se define como la relación fasorial entre el voltaje y la corriente que circula por él, tal como se expresa en la ecuación siguiente:

$$Z = \frac{V}{I}$$

Como entre el primario y el secundario cambian los valores de corriente y voltaje, también lo hace la relación que existe entre ellos y por lo tanto cambia el valor de la impedancia.



En el esquema anterior, la impedancia del elemento vista desde el secundario está dada por:  $Z'' = \frac{V_2}{I_2}$

Por otro lado, la impedancia del elemento vista desde el devanado primario está dada por:  $Z' = \frac{V_1}{I_1}$

Como el voltaje y la corriente del primario se pueden expresar por:

$$V_1 = aV_2$$

$$I_1 = \frac{I_2}{a}$$

La impedancia del elemento que se ve desde el primario es:

$$Z' = \frac{V_1}{I_1} = \frac{aV_2}{\frac{I_2}{a}} = a^2 \frac{V_2}{I_2} = a^2 Z''$$

La impedancia  $Z'$  corresponde al valor de la impedancia del secundario ( $Z''$ ) referida al primario.

## Transformador real

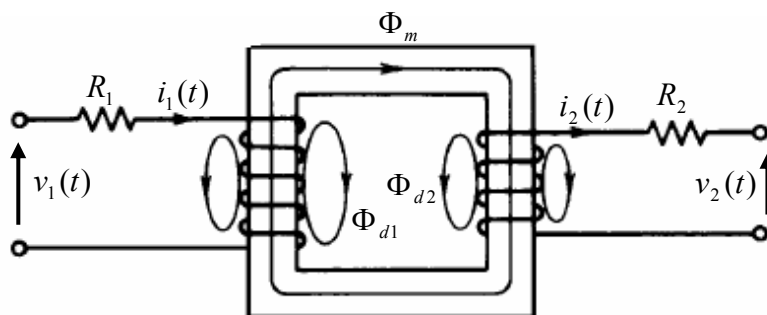
Llamaremos transformador real a aquel que no verifique las condiciones impuestas al transformador ideal. Los transformadores prácticos son naturalmente los transformadores reales.

**Circuito equivalente de un transformador real.-** Las pérdidas que ocurren en los transformadores reales tienen que explicarse en cualquier modelo confiable de comportamiento de transformadores. Los detalles principales que deben tenerse en cuenta para la construcción de tal modelo son:

1. **Pérdidas ( $I^2R$ ) en el cobre.** Pérdidas en el cobre son pérdidas por resistencias en las bobinas primaria y secundaria del transformador. Son proporcionales al cuadrado de la corriente de dichas bobinas.
2. **Pérdidas de corrientes parásitas.** Las pérdidas por corrientes parásitas son pérdidas por resistencia en el núcleo del transformador. Son proporcionales al cuadrado de la tensión aplicada al transformador.
3. **Pérdidas por histéresis.** Las pérdidas por histéresis están asociadas a los reacomodamientos de los dominios magnéticos en el núcleo durante cada medio ciclo. Ellos son una función compleja, no lineal, de la tensión aplicada al transformador.
4. **Flujo de dispersión.** Los flujos que salen del núcleo y pasan por sólo una de las bobinas del transformador se denominan flujos de dispersión. Estos flujos escapados producen una auto inductancia en las bobinas primaria y secundaria y los efectos de esta inductancia deben tenerse en cuenta.

Es posible construir un circuito equivalente que tenga en cuenta las principales imperfecciones de los transformadores reales. Considerando las resistencias e inductancias de los devanados primarios y secundarios, además de los efectos que tiene el núcleo sobre los voltajes y corrientes del transformador, se puede establecer el circuito equivalente:

En la siguiente figura se aprecia el sistema magnético del transformador real.



Sistema magnético del transformador real

Donde:

$v_1(t)$  = Tensión del devanado primario.

$v_2(t)$  = Tensión del devanado secundario.

$i_1(t)$  = Corriente del devanado primario.

$i_2(t)$  = Corriente del devanado secundario.

$\Phi_m$  = Componente del flujo de enlace entre la bobina primaria y secundaria.

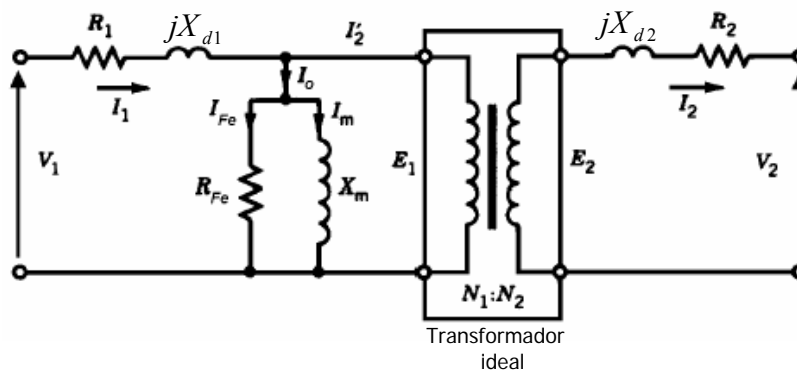
$\Phi_{d1}$  = Flujo de dispersión del primario.

$\Phi_{d2}$  = Flujo de dispersión del secundario.

$R_1$  = Resistencia en la bobina primaria, por pérdidas en el cobre.

$R_2$  = Resistencia en la bobina secundaria, por pérdidas en el cobre.

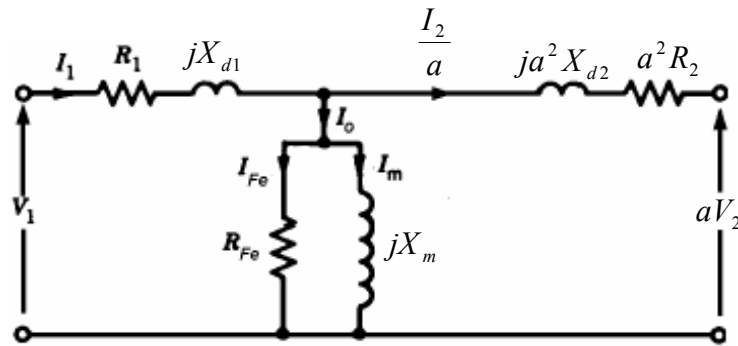
En la siguiente figura se muestra el circuito equivalente resultante de un transformador real, muestra un modelo exacto de un transformador, no es de mucha utilidad para analisis de circuitos practicos que contengan transformadores; normalmente es necesario convertir el circuito entero en un circuito equivalente, con un nivel de voltaje unico, el circuito equivalente se debe referir, bien a su lado primario o bien al secundario.



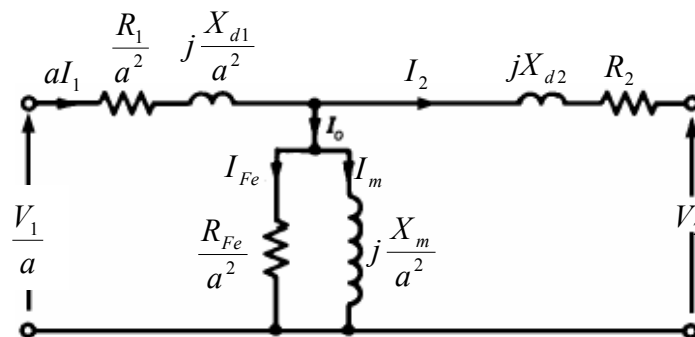
**Modelo de transformador real**

El circuito equivalente permite calcular todas las variables incluidas pérdidas y rendimiento.

Los elementos del circuito equivalente se obtienen mediante ensayos normalizados Una vez resuelto el circuito equivalente los valores reales se calculan deshaciendo la reducción al primario.



Modelo de transformador referido al voltaje primario

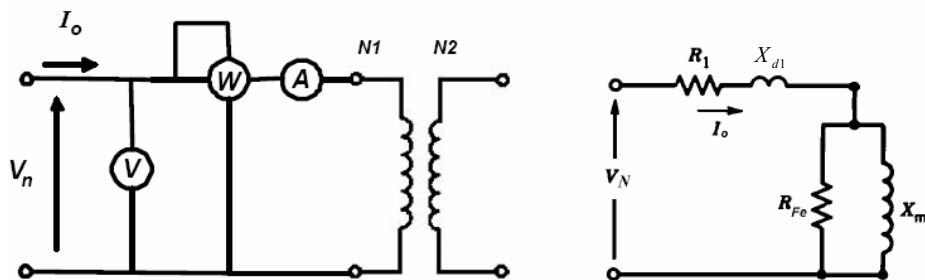


Modelo de transformador referido al voltaje secundario

Es posible determinar experimentalmente los valores de las inductancias y resistencias en el modelo del transformador. Una aproximación adecuada de estos valores se puede obtener con los ensayos siguientes:

### Ensayo de circuito abierto

Se obtienen los componentes que se encuentran conectados en paralelo. Nos proporciona la reactancia de magnetización  $X_m$  y la resistencia por pérdidas en el núcleo  $R_{Fe}$ .



a) Conexionado    b) Circuito equivalente

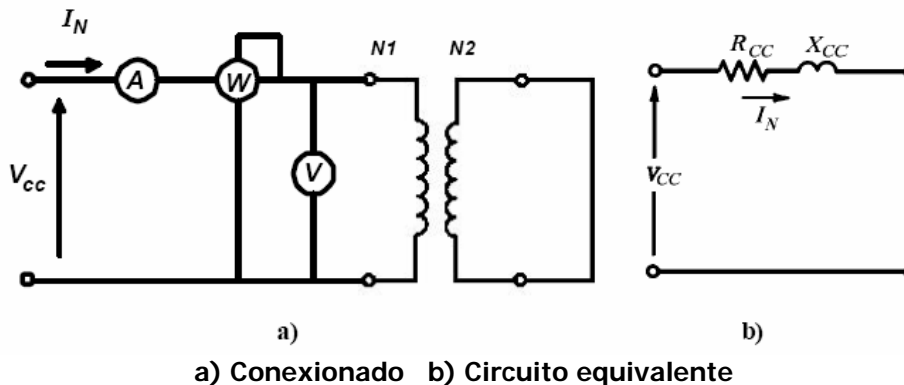
## Ensayo de corto circuito

Se obtienen los componentes que están conectados en serie.

La resistencia  $R_{CC}$  por pérdidas en el cobre y la reactancia de corto circuito  $X_{CC}$  a consecuencia de pérdidas por dispersión de flujo magnético  $X_{d1}$  y  $X_{d2}$ .

Tensión de cortocircuito ( $V_{CC}$ ) = 2 a 12% de  $V_N$  (que es la tensión que se aplica al primario).

Pérdidas en el cobre ( $W = I^2 R$ ) (son las pérdidas por efecto Joule en los devanados del transformador cuando este opera a la plena carga de corriente nominal).

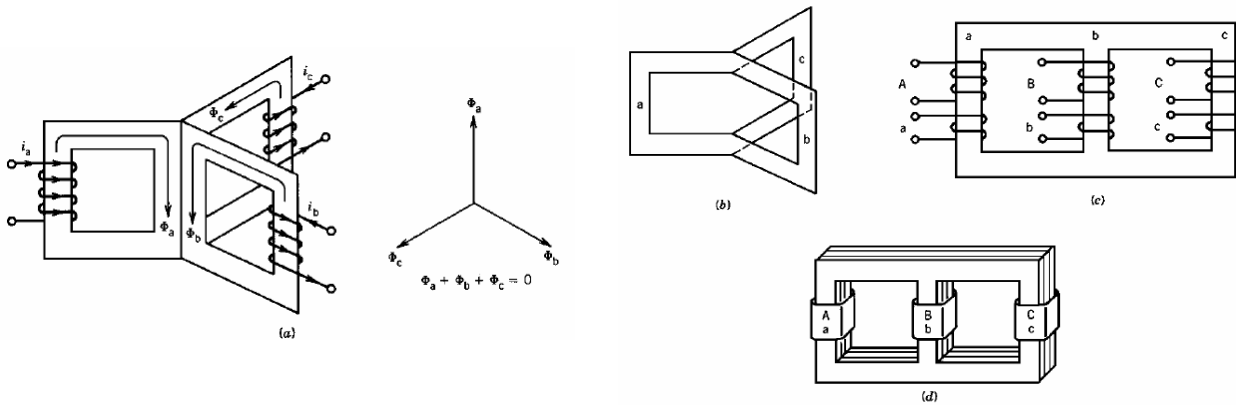


**Transformadores trifásicos.**- Casi todos los sistemas importantes de generación y distribución de potencia del mundo son, hoy en día, sistemas trifásicos. Puesto que los sistemas trifásicos desempeñan un papel importante en la vida moderna, es necesario entender la forma como los transformadores se utilizan en ella. Los transformadores para circuitos trifásicos pueden construirse de dos maneras. Una de ellas es, sencillamente, tomando tres transformadores monofásicos y conectándolos en un grupo trifásico.

Otra alternativa es haciendo un transformador trifásico que consiste en tres juegos de devanados enrollados sobre un núcleo común. **Hoy en día se prefiere la construcción directa de un transformador trifásico ya que es más liviano, más barato y ligeramente más eficiente que los bancos de transformadores monofásicos.**

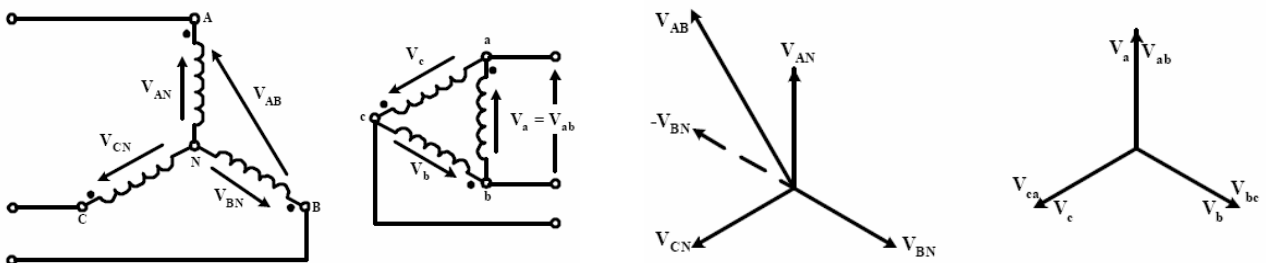
Si la transformación se hace mediante un transformador trifásico, con un núcleo común, podemos ver que la columna central (fig. a) está recorrida por los flujos  $\Phi_a$ ,  $\Phi_b$ , y  $\Phi_c$ ; que en cada instante, es la suma de tres flujos sinusoidales, iguales y desfasados  $120^\circ$ . El flujo  $\Phi$  resultante será pues siempre nulo. En consecuencia, se puede suprimir la columna central (fig. b). Como esta disposición (fig. b) hace difícil su construcción, los transformadores se construyen con las tres columnas en un mismo plano (fig. c). Esta disposición crea cierta asimetría en los flujos y por lo tanto en las corrientes en vacío. En carga la desigualdad de la

corriente es insignificante, y además se hace más pequeña aumentando la sección de las culatas con relación al núcleo central.



Desarrollo del núcleo de un transformador trifásico

**Desfasaje entre devanados.**- Las conexiones Dy o Yd crean desfasaje entre las tensiones de líneas del primario y secundario. Los desfasajes son múltiplo de  $30^\circ$ .



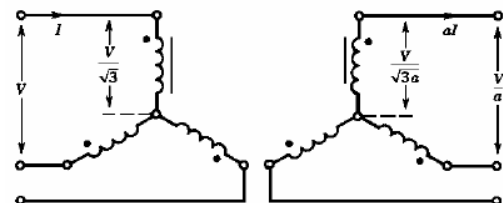
Desfase entre las tensiones línea-línea en los devanados primario y secundario de un transformador trifásico

### Ventajas y desventajas de cada conexión del transformador trifásico

#### ▪ Conexión Y-y

*Inconvenientes:*

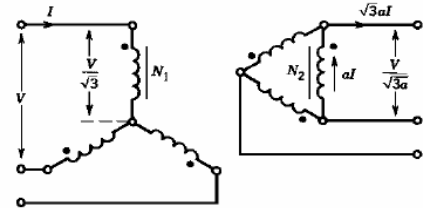
- Carga desequilibrada provoca fuerte desequilibrio de tensiones de fase (máximo desequilibrio del 10% de la corriente nominal del secundario)
- Existe un problema grave con los terceros armónicos de voltaje. Este tercer armónico de tensión puede llegar a ser mayor que el mismo voltaje fundamental.



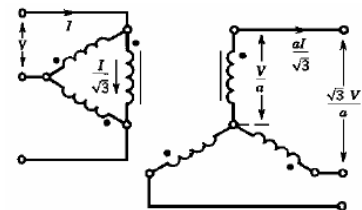
*Solución a inconvenientes:*

- Aterrizar los neutros del transformador, especialmente el neutro del primario. Se logra eliminar la posibilidad de sobre tensión. Asimismo, el neutro provee un camino de retorno a cualquier desequilibrio de carga.
- Incluir un tercer devanado (terciario). Los componentes del 3er armónico de tensión de la delta se suman dando lugar a una corriente circulante, con ello se suprime las componentes del 3er armónico.

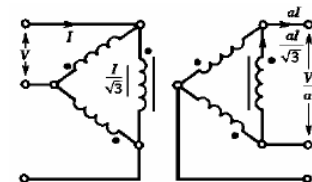
- **Conexión Y-d** Esta conexión es más estable bajo cargas desequilibradas, ya que el delta redistribuye parcialmente cualquier desequilibrio que se presente.



- **Conexión D-y** Esta conexión, no motiva flujos por el aire en caso de cargas desequilibradas (cortocircuitos). Tampoco se presentan traslados de neutros (sobre tensiones). No genera 3eros armónicos. Admite desequilibrios de cargas.



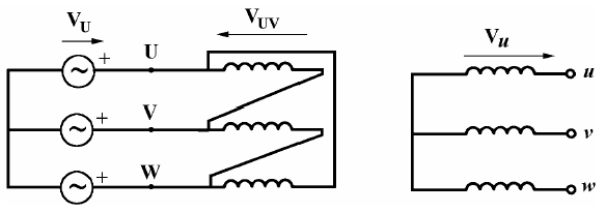
- **Conexión D-d** No presenta problemas de armónicos ni de cargas desequilibradas.



- **Conexión Y-z** En transformadores de distribución de potencia reducida. Se puede sacar neutro en baja. Se puede conectar a tensiones relativamente elevadas. Admite toda clase de desequilibrios. Las tensiones en el secundario no presentan 3ras armónicas.

**Grupos de conexión en transformadores trifásicos.-** Producto de la forma en que conecte internamente los devanados primario y secundario del transformador se presentarán desfases entre las tensiones del primario y del secundario. Este desfase se suele determinar con la ayuda del método del Reloj, debido a que los desfases que se producen son múltiplos de  $30^\circ$  y el reloj está dividido en 12 divisiones de  $30^\circ$ . Las conexiones de los transformadores suelen darse como sigue:

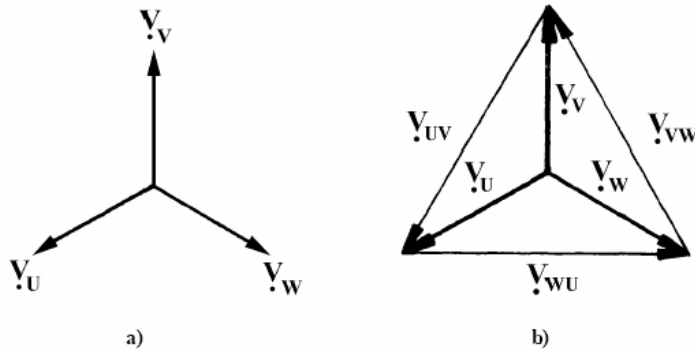




U, V, W : Devanados de alta tensión.  
u, v, w : Devanados de baja tensión. } Norma Alemana.

H1, H2, H3 : Devanados de alta tensión.  
x1, x2, x3 : Devanados de baja tensión. } Norma Americana.

**Transformador Delta-Estrella**



Diagramas vectoriales a) Tensiones fase-neutro; b) Tensiones entre líneas y fase-neutro.

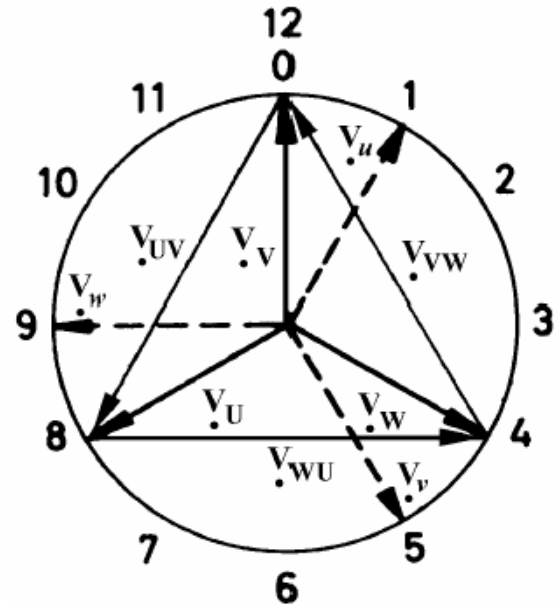
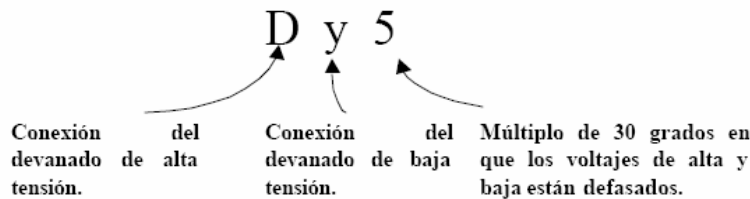


Diagrama vectorial para la definición del grupo de conexión

Desfase entre  $V_{\dot{v}}$  y  $V_{\dot{v}}$  : 150°.

Grupo de conexión del transformador de fig.2.35:



Según IEC 76 transformadores de Potencia, anexo E se distinguen cuatro grupos de conexiones.

**GRUPO I** : Índices horarios 0, 4 y 8

**GRUPO II** : Índices horarios 2, 6 y 10

**GRUPO III** : Índices horarios 1 y 5

**GRUPO V** : Índices horarios 7 y 11

La marcha en paralelo de dos transformadores con el mismo índice horario es siempre posible. Si los índices horarios difieren en 4 u 8 (o sea 120° ó 240°) los transformadores pertenecerán al mismo grupo y por lo tanto, es posible su conexión en paralelo con uno o dos corrimientos cíclicos.

Tabla de índices horarios

1		2		3		4		5		6		7		8	
Identificación		Diagrama				Esquema				Relación de tensiones compuestas (*)		Antigua denominación V.D.E.			
Desfase (Ang. de B.T. en retraso)	Denominación C.E.I.	A.T.		B.T.		A.T.		B.T.		UAT	UBT				
0°	Dd0					$\frac{N_A}{N_B}$						A <sub>1</sub>			
	Yy0					$\frac{N_A}{N_B}$						A <sub>2</sub>			
	Dz0					$\frac{2N_A}{3N_B}$						A <sub>3</sub>			
150°	Dy5					$\frac{N_A}{\sqrt{3}N_B}$						C <sub>1</sub>			
	Yd5					$\frac{\sqrt{3}N_A}{N_B}$						C <sub>2</sub>			
	Yz5					$\frac{2N_A}{\sqrt{3}N_B}$						C <sub>3</sub>			
180°	Dd6					$\frac{N_A}{N_B}$						B <sub>1</sub>			
	Yya					$\frac{N_A}{N_B}$						B <sub>2</sub>			
	Dz6					$\frac{2N_A}{3N_A}$						B <sub>3</sub>			
-30°	Dy11					$\frac{N_A}{\sqrt{3}N_B}$						D <sub>1</sub>			
	Yd11					$\frac{\sqrt{3}N_A}{N_B}$						D <sub>2</sub>			
	Yz11					$\frac{2N_A}{\sqrt{3}N_B}$						D <sub>3</sub>			

### 3.3 FUNDAMENTOS DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS

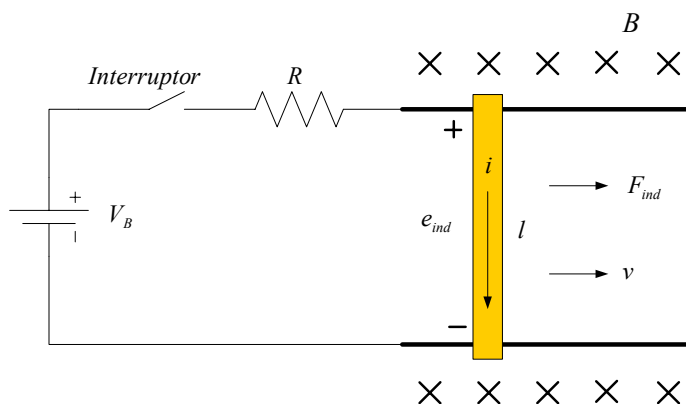
Las maquinas de c.c lineal es posiblemente la versión mas simple a mas fácil de entender de una maquina de c.c., aunque funcione de acuerdo con los mismos principios y tenga el mismo comportamiento de los generadores y los motores reales. Por tanto sirve como un buen ejemplo de partida para el estudio de las maquinas de c.c.

En la siguiente figura se muestra una maquina lineal; consta de una batería y una resistencia conectada a través de un interruptor a un par de rieles lisos y desprovistos de fricción, a lo largo de esta carrilera hay un campo magnético.

Funcionamiento como motor:

- Al cerrar el interruptor se produce un flujo de corriente  $i = V_B / R$ .
- El flujo de corriente produce una fuerza en la varilla que se expresa por  $F_{ind} = i l B$ .
- La varilla se acelera hacia la derecha, produciendo un voltaje inducido mientras se acelera ( $e_{ind} = v B l$ ).
- Este voltaje inducido reduce el flujo de corriente  $i = (V_B - e_{ind}) / R$ .
- La fuerza inducida se disminuye ( $F_{ind} = i l B$ ) hasta que eventualmente  $F = 0$ . En este punto,  $e_{ind} = V_B$ ,  $i = 0$ , y la varilla se mueve a velocidad constante sin carga  $v_{ss} = V_B / B l$ .

Se observa el comportamiento de un motor de cc real, en derivación, al ponerlo en operación (vacío).

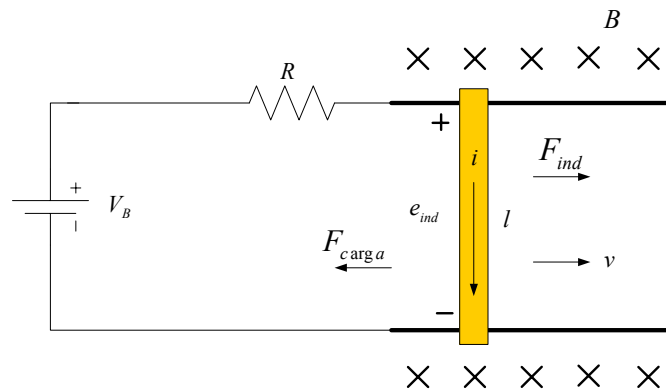


**Motor lineal de c.c. en vacío**

Ahora supongamos que la maquina lineal esta marchando inicialmente a la velocidad sin carga, en la condición estable que se describió anteriormente.

Si aplicamos a la varilla una carga externa ó una fuerza  $F_{carga}$  opuesta a la dirección del movimiento; se comportara de la siguiente manera:

- Una fuerza  $F_{carga}$  aplicada en sentido contrario a la dirección del movimiento causa una fuerza neta  $F_{neta}$  opuesta a la dirección del movimiento ( $F_{neta} = F_{carga} - F_{ind}$ ).
- La aceleración resultante  $a = F_{neta} / m$  es negativa y por consiguiente la varilla se desacelera ( $v \downarrow$ ).
- El voltaje inducido  $e_{ind} = vBl$  baja y por lo tanto  $i = (V_B - e_{ind}) / R$  aumenta.
- La fuerza inducida  $F_{ind} = ilB$  aumenta hasta  $|F_{ind}| = |F_{carga}|$ , pero a una velocidad menor  $v$ .
- Una cantidad de potencia eléctrica igual a  $P_{conv} = e_{ind} i = F_{ind} v$  se convierte ahora en potencia mecánica ( $F_{ind} v$ ), y la maquina esta actuando como motor.

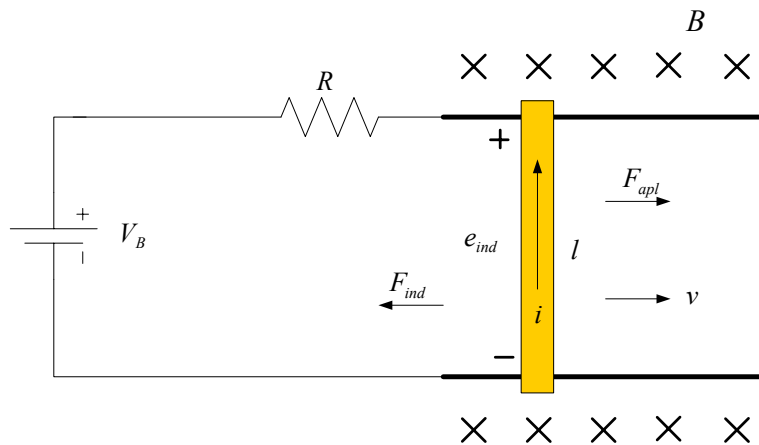


**Motor lineal de cc con carga**

Funcionamiento como generador:

- Una fuerza  $F_{apl}$  se aplica en la dirección del movimiento;  $F_{neta}$  esta en la misma dirección.
- La aceleración  $a = F_{neta} / m$  es positiva, por lo cual la varilla se acelera ( $v \uparrow$ ).
- El voltaje  $e_{ind} = vBl$  aumenta por lo tanto  $i = (e_{ind} - V_B) / R$  también aumenta. La dirección de la fuerza inducida se explica por la regla de la mano derecha, esta fuerza inducida se opone a la fuerza aplicada a la varilla.
- La fuerza inducida  $F_{ind} = ilB$  aumenta hasta que  $|F_{ind}| = |F_{apl}|$  a una mayor velocidad  $v$ .

- Una cantidad de potencia mecánica igual a  $F_{ind} v$  esta convirtiéndose ahora en potencia eléctrica  $e_{ind} i$ , y la maquina esta actuando como generador

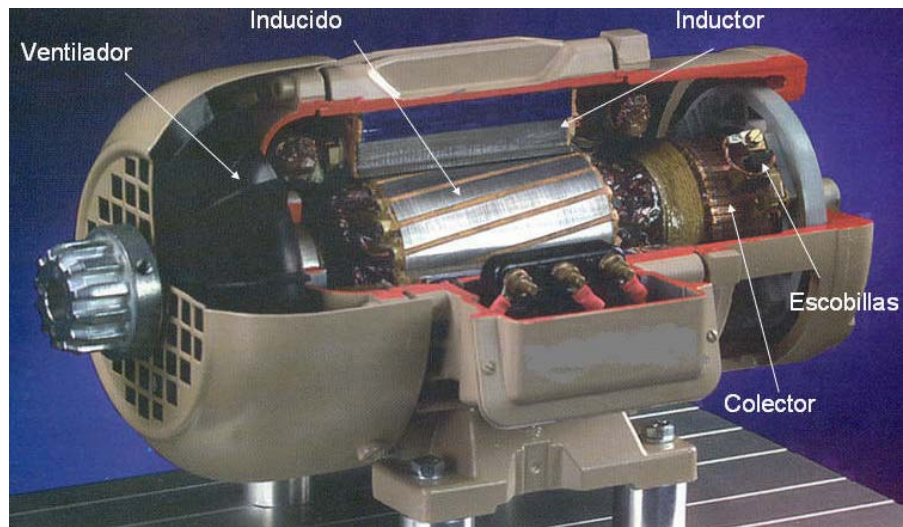


Maquina lineal de cc como generador

### 3.4 Generadores de Corriente continua (c.c.)

Los generadores de cc ó dinamos, son maquinas de cc que se usan como generadores, no hay diferencia entre real entre un generador y un motor, pues solo se diferencian por la dirección del flujo de potencia. Constructivamente, en ambos casos, es exactamente lo mismo.

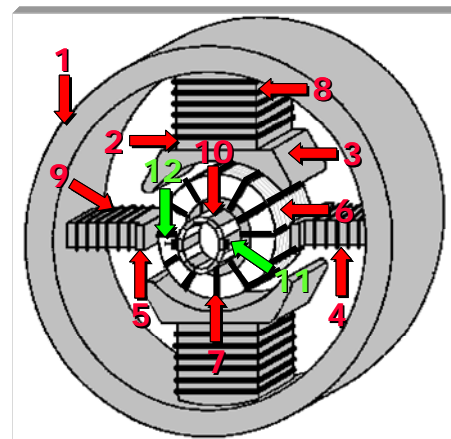
- La máquina de CC consta de dos devanados alimentados con CC: uno llamado inductor que está en el estator de la máquina y otro llamado inducido que está en el rotor.
- En el caso de funcionamiento como generador se alimenta con CC el inducido y se obtiene la FEM por el inductor (también continua).
- Su funcionamiento se basa en la existencia de un mecanismo llamado colector que convierte las magnitudes variables generadas o aplicadas a la máquina en magnitudes constantes.
- Están en desuso debido a su complejo mantenimiento, en reemplazo a los generadores se utiliza la corriente alterna en combinación con componentes electrónicos SCR.



Maquina de corriente continua

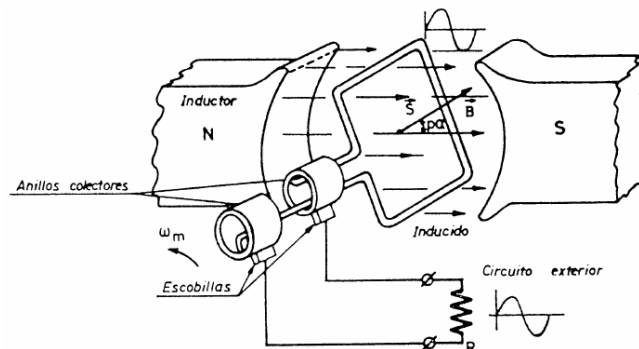
**Forma constructiva**

1. Culata o estator.
2. Núcleo polar.
3. Expansión polar.
4. Núcleo del polo auxiliar o de conmutación.
5. Expansión del polo auxiliar o de conmutación.
6. Núcleo del rotor ó inducido.
7. Arrollamiento de inducido.
8. Arrollamiento de excitación.
9. Arrollamiento de conmutación.
10. Colector.
11. - 12. Escobillas.



**Principio de funcionamiento**

Energía mecánica de entrada mueve rotor, la fuerza electromotriz f.e.m. inducida que, al conectarse a una carga, produce corriente por el inducido.



Principio de funcionamiento de una maquina sincrónica

Generación de la fuerza electromotriz fem (ca).

Por simplicidad, representaremos a una máquina bipolar sincrónica, con un inducido que posee una bobina, cuyos extremos se conectan a dos anillos, según la figura anterior, consideremos que gira en sentido antihorario, accionado por un motor, es decir lo analizaremos como generador. La bobina, al desplazarse corta al campo magnético  $B$  generado por polos N y S.

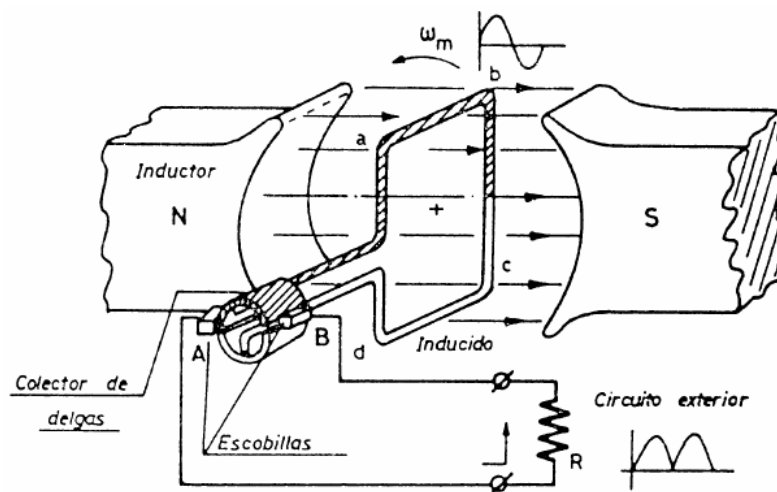
En su desplazamiento corto cada vez más líneas de campo, crece  $B$  y por consiguiente la fem generada es:

$$e = B \cdot l \cdot v$$

Donde:  $e$  : Tensión inducida  
 $B$  : Campo magnético  
 $l$  : Longitud del conductor  
 $v$  : Velocidad

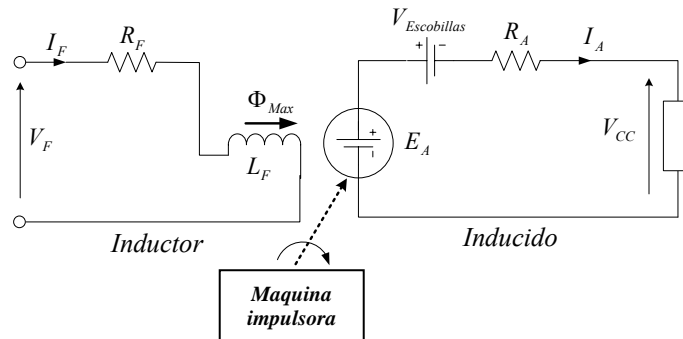
Como el objeto de esta máquina es generar corriente continua, se debe "rectificar" la onda alterna obtenida, para ello se dispone del colector, que no es más que un rectificador mecánico.

En la siguiente figura, se han conectado los extremos de la bobina a un colector de delgas, se observa que cuando gira bajo el polo N y S, genera la corriente en un mismo sentido; por consiguiente ahora la onda está rectificada. Se observa que cuando la bobina circula por la zona neutra, que es cuando no genera, no hay corriente, se produce la inversión en las conexiones, lo que evita se produzcan chispas.



**Circuito equivalente.-** En la siguiente figura se representa el circuito equivalente de un generador de c.c., el circuito del inducido se representa por una fuente de voltaje ideal  $E_A$  y una resistencia  $R_A$ . Esta representación es realmente el equivalente de Thevenin de toda la estructura del rotor, incluyendo las bobinas, los polos auxiliares y los bobinados de compensación, si los hay. La caída de tensión en las escobillas se representa por una batería  $V_{Escobillas}$  cuya polaridad está en sentido contrario a la dirección del flujo de corriente de la máquina. Las bobinas de

campo, que producen flujo magnético en el generador, se representan por el inductor  $L_F$  y la resistencia  $R_F$ .



### Generador de corriente continúa con excitación independiente

El campo magnético producido por los polos del estator, inducen un voltaje en los bobinados del rotor ó armadura, cuando el generador esta girando. La corriente de campo de los polos genera un flujo magnético. El flujo magnético es proporcional con la corriente de campo, si el núcleo no esta saturado.

$$\Phi = K I_f$$

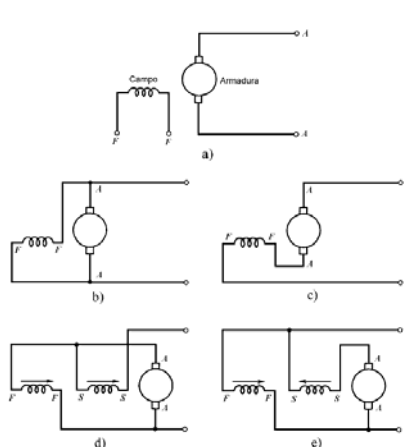
El voltaje  $E_A$  generado en el interior de un generador esta expresada por medio de la ecuación.

$$E_A = K \cdot \Phi \cdot \omega$$

Cuando al generador se conecta una carga, la corriente de carga produce una caída de tensión en la resistencia de bobinados del rotor, en adición hay una caída de tensión constante de mas o menos 1–3 Voltios en las escobillas; estas dos caídas de tensión reducen el voltaje en los terminales del generador. El voltaje en los terminales es;

$$E_A = V_{CC} + I_A R_A + V_{Escobillas}$$

**Clasificación de las maquinas de corriente continúa.-** Hay cinco tipos principales de generadores de cc, que se clasifican según la forma en que se produce su flujo de campo.



#### Conexiones de algunas máquinas de corriente continúa:

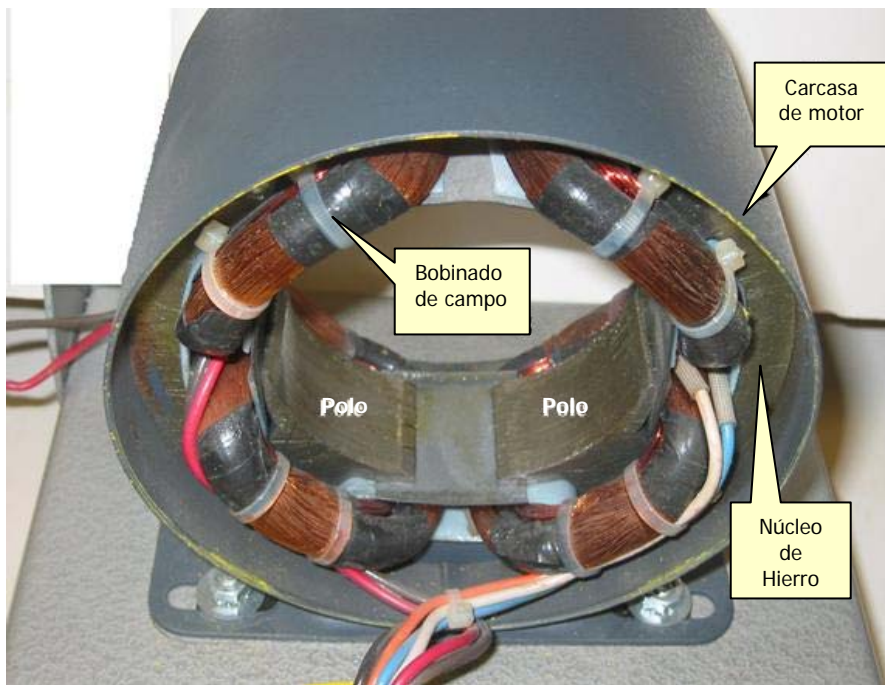
- a) De excitación independiente.
- b) Paralelo ó derivación.
- c) Serie.
- d) Compensada acumulativa.
- e) Compensada diferencial.



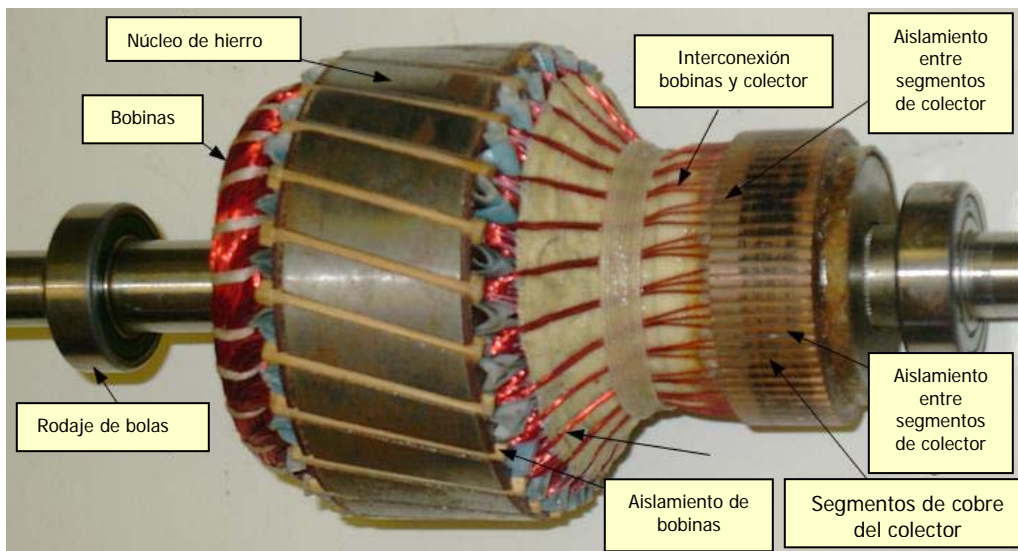
### 3.5 Motores de C.C.

Un motor de corriente continua consiste esencialmente en un generador de c.c. trabajando en régimen inverso, ya que un motor de c.c. es la misma maquina física que un generador de c.c. La mayor ventaja de un motor eléctrico de c.c. es la fácil regulación de su velocidad y momento de torsión. Se utilizan en tracción eléctrica (tranvías, trenes etc.) y en accionamientos donde se precisa un control preciso de la velocidad.

*Sin embargo, el reciente desarrollo de la electrónica de potencia reduce el uso de motores y generadores de c.c.; los controladores electrónicos de c.a., gradualmente reemplazan el motor de c.c. por motores de c.a., en la industria.*



Estator con polos visibles de motor de corriente continúa



Rotor de un motor de corriente continúa

## Tipos de bobinado del inducido

Se tiene dos tipos de bobina:

*Bobinado imbricado:* se utiliza para grandes intensidades y tiene muchos recorridos en paralelo. Requiere de un gran número de campo y un número igual de escobillas.

*Bobinado ondulado:* se emplea para grandes voltajes. Cuenta con dos recorridos en paralelo y dos escobillas independientemente del número de polos.

## Colector

El colector es un conjunto de delgas (segmentos de cobre aisladas entre sí), que se encuentran en el eje del rotor.

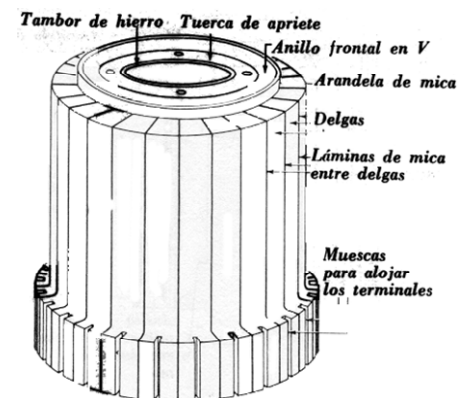
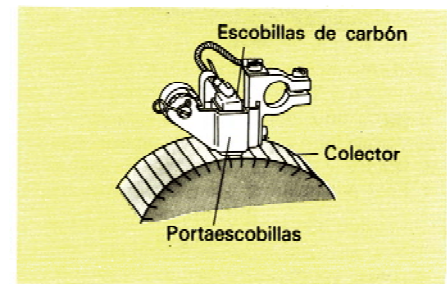
Los terminales de las bobina se sueldan a las delgas. El conjunto colector y escobillas permite la rectificación.

Rectificación mecánica:

Una forma de enviar la f.e.m. inducida en la espira a un circuito exterior es emplear el llamado colector de delgas.

Se observa que los extremos de la espira van a parar a un anillo formado por dos segmentos de cobre denominados delgas, aisladas entre sí del eje de la máquina. Sobre las delgas van colocadas unas escobillas fijas en el espacio, a las cuales se conecta el circuito exterior.

La misión del colector de delgas es obligar a que la corriente que atraviesa el circuito exterior circule siempre en el mismo sentido.

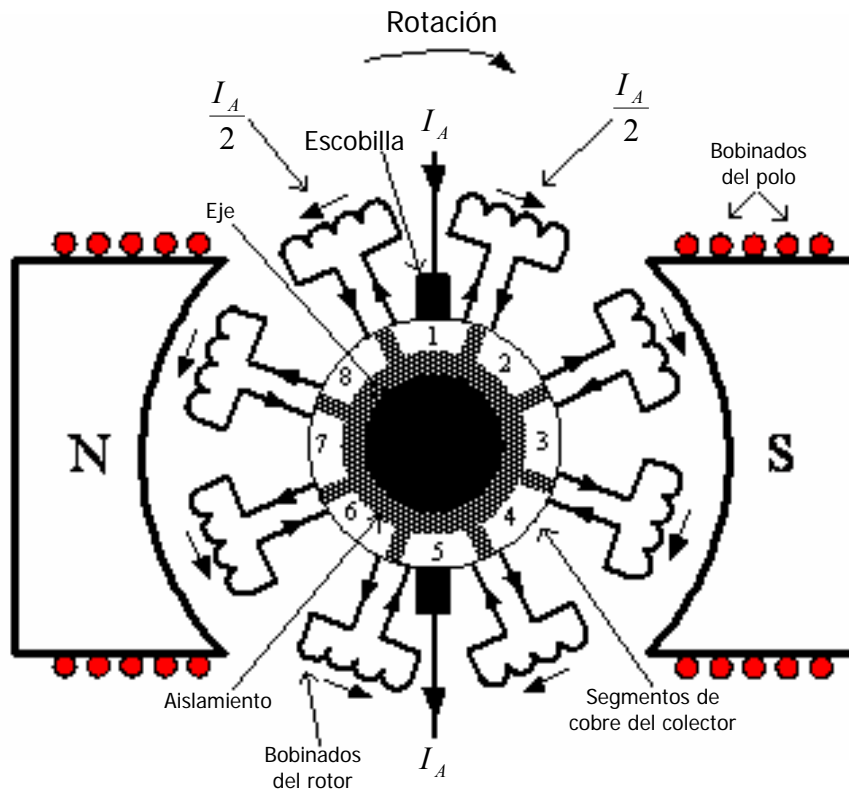


Colector

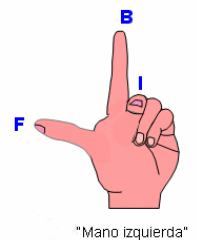
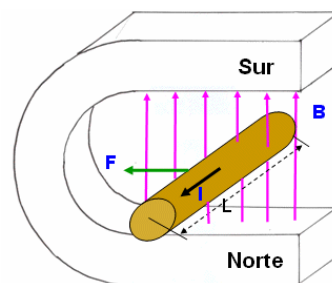
## Principio de funcionamiento

En un motor de c.c., los polos del estator son suministrados por una corriente de excitación, los cuales producen un campo magnético constante.

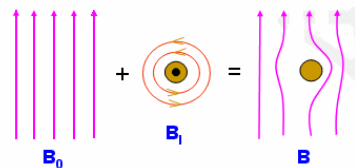
El rotor es suministrado por una corriente c.c., a través de las escobillas, colector y bobinas. La interacción del campo magnético y la corriente del rotor generan una fuerza de tal manera que entra en movimiento el motor.



Las líneas del campo magnético entran al rotor desde el polo norte (N) y salen hacia el polo sur (S). Los polos generan un campo magnético, siendo perpendicular a la corriente que llevan los conductores. La interacción entre el campo y la corriente, produce una fuerza de Lorentz. La fuerza es perpendicular a ambos, al campo magnético y conductor.



"Mano izquierda"



$$F = I \cdot L \cdot B$$

**Reacción magnética del inducido:**

El campo creado por los polos magnéticos son perpendiculares al plano neutro (figura a).

Plano neutro: es la zona donde una bobina no induce tensión.

La corriente que circula por el devanado del inducido da lugar a un campo transversal que afectará al campo principal (figura b).

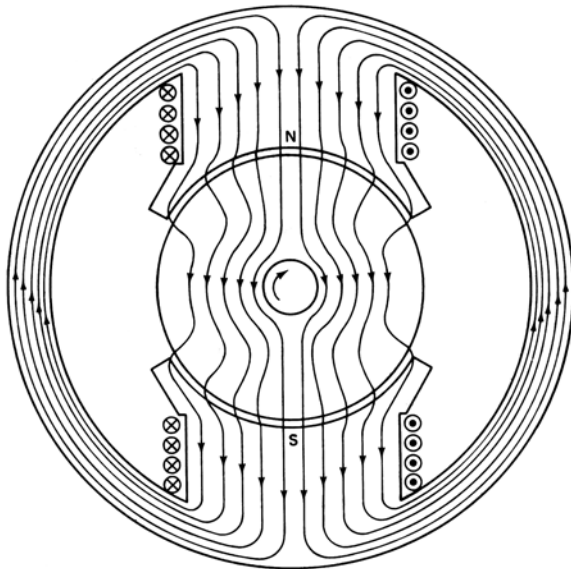


Figura (a)

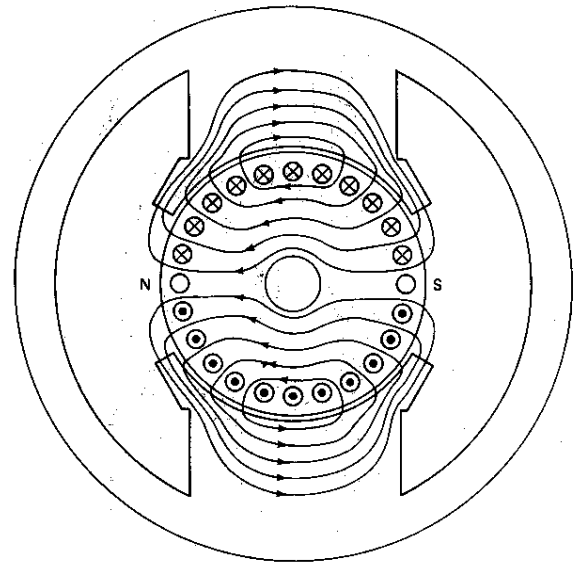


Figura (b)

El campo principal se perturba debido a la presencia del campo de la armadura, perturbación que depende de la magnitud de la carga (figura c).

Producto de la reacción de la armadura provoca el corrimiento del plano neutro en sentido contrario al sentido de giro del motor (figura d).

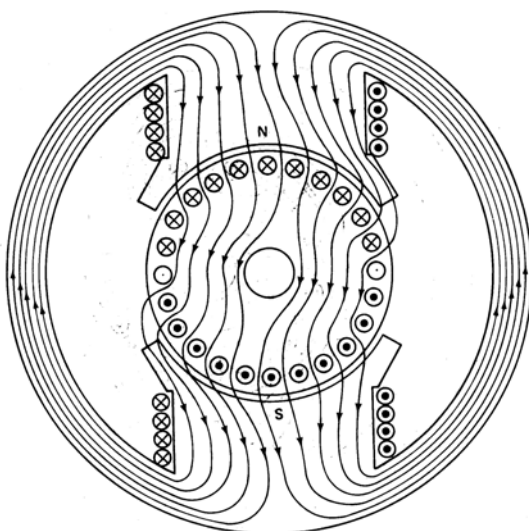


Figura (c)

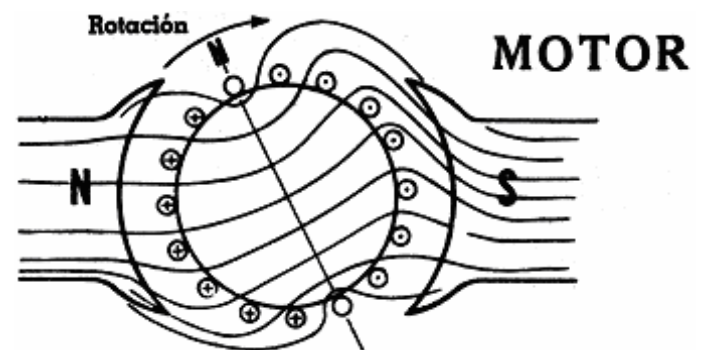


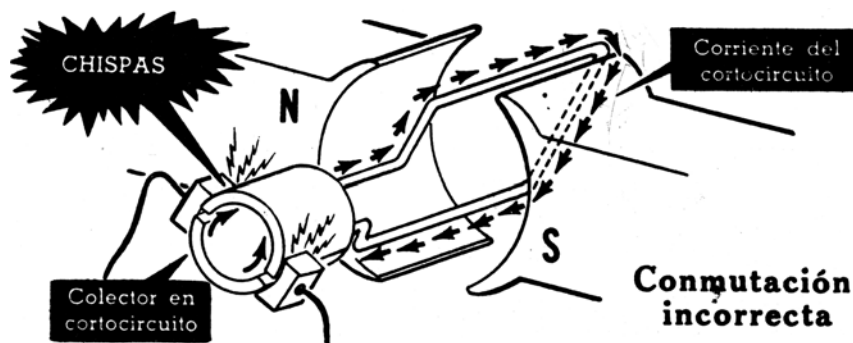
Figura (d)

## Chisporroteo

Producto del corrimiento del neutro, la conmutación se efectúa fuera del plano neutro, haciéndose que se cortocircuito bobinas con tensión, provocándose un elevado chisporroteo.

Para mejorar la conmutación se incluye los polos intermedios, de allí que también se les llame polos de conmutación.

Para grandes potencias y cuando los motores se carguen bruscamente se incluye el devanado de compensación, que tiene sentido contrario al campo de la armadura y varía en forma proporcional a la carga dado que se conecta en serie con el inducido.



## Sistemas de excitación

A continuación se exponen los sistemas de excitación más utilizados en la práctica:

Excitación por Imanes Permanentes.

Excitación Independiente.

Auto excitación:

- Excitación Serie.
- Excitación Paralelo ó Derivación.
- Excitación Compuesto.

### Excitación por imanes permanentes

Ventajas:

No necesitan corriente magnetizante, reduciéndose así el gasto energético de la misma al no producirse, en el circuito de excitación, pérdidas por efecto Joule.

Se consigue un primer abaratamiento en su construcción, al suprimirse los conductores que constituyen el devanado de excitación.

Poseen una excitación estable.

Inconvenientes:

Hacen limitado su uso exclusivamente en máquinas de muy baja potencia, los cuales pasamos a enumerar:

- Poseen un campo magnético fijo sin posibilidad de regulación.

- El campo magnético es relativamente débil, presentando la máquina unas elevadas dimensiones con relación a la potencia desarrollada.
- La tecnología de elaboración e imantación de los imanes permanentes es compleja y por tanto, costosa.

### Motor de excitación independiente

El circuito de excitación es completamente independiente del circuito de inducido, y la red de alimentación del inducido puede ser distinta de la red de alimentación de la excitación.

Este tipo de excitación presenta una gran ventaja sobre el resto de sistemas de excitación, dado que al poder ser la corriente inductora totalmente independiente de la tensión de red que alimenta al motor, permite una amplia gama de regulaciones del motor. Sin embargo, la necesidad de una fuente exterior limita las aplicaciones de la excitación independiente.

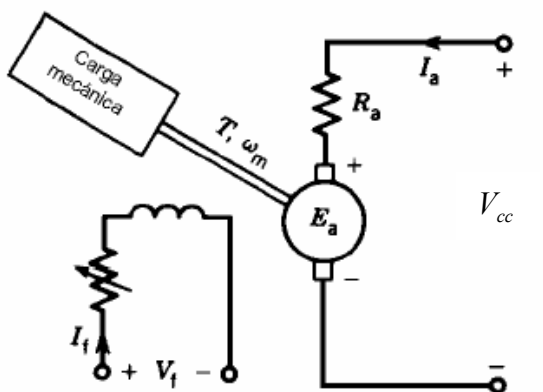
#### Características:

Tiene la mejor regulación de velocidad de los motores DC.

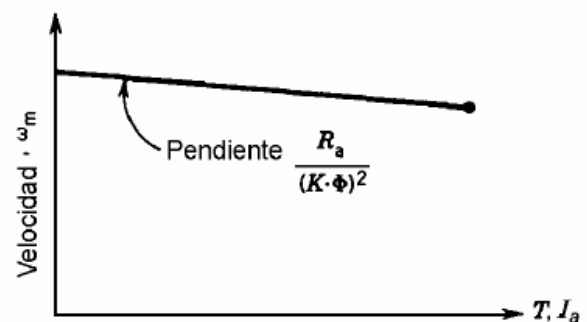
Para reducir la velocidad se reduce la tensión en la armadura y para elevar la velocidad se reduce la corriente de campo.

No se emban en vacío.

Se emplea cuando se requiere variar la velocidad en amplios rangos, por ejemplo en accionamientos de rectificadoras, fresadoras y otras máquinas herramientas de precisión.



Motor de excitación independiente



Característica de carga de un motor de excitación independiente

**Las ecuaciones de operación para este tipo de motor son:**

Ecuación del motor independiente  $V_{cc} = E_a + R_a I_a$

El voltaje generado en el interior de esta maquina esta dado por la ecuación

$$E_a = K \cdot \Phi \cdot \omega_m$$

La potencia de salida y momento de torsión son:

$$P_{salida} = E_a \cdot I_a \quad T = \frac{P_{salida}}{\omega} = K \cdot I_a \cdot I_f = K \cdot \Phi \cdot I_a$$

La relación momento de torsión-velocidad del motor esta determinado por la siguiente ecuación:

$$\omega_m = \frac{V_{cc}}{K\Phi} - \frac{T}{[K\Phi]^2} R_a$$

### **Motor de excitación en paralelo ó derivación**

El devanado de campo de muchas espiras de sección delgada (elevada resistencia eléctrica) se conecta en paralelo a la armadura.

Características:

Su regulación de velocidad es bastante buena, aunque mayor que el excitación independiente.

Su momento de torsión en el arranque es bueno.

Su corriente de arranque es alta.

El momento de torsión desarrollado es directamente proporcional a la corriente de la armadura.

Si en operación normal, se abre el campo se embala.

Aplicación:

El motor en derivación o paralelo se emplea en todos aquellos casos en que sea preciso una velocidad de giro uniforme, por ejemplo, para accionar máquinas herramientas.

**Desde el punto de vista funcional los motores de excitación independiente y excitación en derivación, son muy similares ya que el inducido está sometido a una tensión constante.**

### Motor de excitación serie

El devanado de excitación está conectado en serie con la armadura, que es de sección gruesa y de pocas espiras (baja resistencia).

La corriente de campo es igual a la corriente de armadura  $I_f = I_a$  y este último depende de la carga arrastrada por el motor, por lo tanto, sus características funcionales serán distintas de las del motor de excitación independiente.

#### Características:

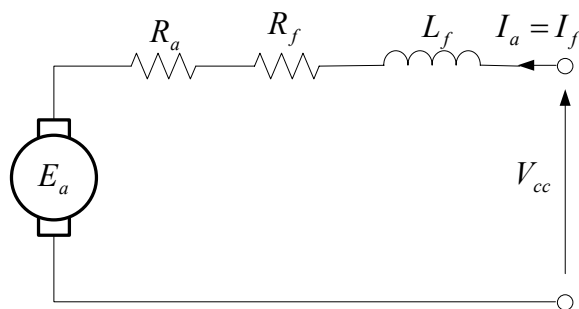
El par desarrollado es proporcional al cuadrado de la corriente por la armadura, de allí que su par de arranque es muy alto, resultando una de sus principales ventajas.

Cuando la carga es muy pequeña o nula, la corriente por la armadura y el campo es también reducida, provocando embalamiento de la máquina.

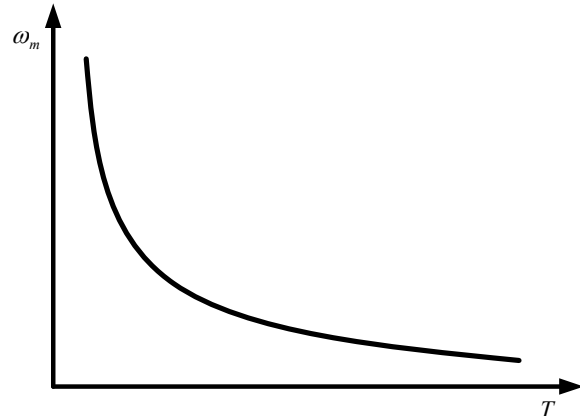
Por el contrario, cuando la carga se eleva, también lo hace la corriente de campo, reduciéndose notoriamente la velocidad. En otras palabras, su regulación de velocidad es alta y dependiente de la carga.

Se acoplan directamente a la carga, no emplean fajas, para evitar el riesgo de embalamiento.

Se emplean en vehículos de tracción eléctrica, ascensores, etc.



Motor de excitación en serie



Característica de carga de un motor de excitación en serie

### Las ecuaciones de operación del motor de excitación en serie son:

Ecuación del motor en serie

$$V_{cc} = E_a + [R_a + R_f] \cdot I_a$$

El voltaje generado en el interior de esta maquina esta dado por la ecuación

$$E_a = K \cdot \Phi \cdot \omega_m$$



En esta maquina el momento de torsión esta dada por:

$$T = K \cdot \Phi \cdot I_a = K \cdot c \cdot I_a^2$$

Donde  $c$  es una constantes de proporcionalidad

La relación momento de torsión-velocidad para esta maquina es:

$$\omega = \frac{V_{cc}}{\sqrt{Kc}} \frac{1}{\sqrt{T}} - \frac{R_a + R_f}{Kc}$$

### **Motor de excitación compuesta**

Posee los devanados de campo serie y derivación, conectados a la armadura.

Posee las características de ambos motores.

Características

Elevado par de arranque, aunque menor que la de un serie.

Su regulación de velocidad es mayor que la de derivación, pero menor que la del motor en serie.

No corre el riesgo de embalsarse en vacío.

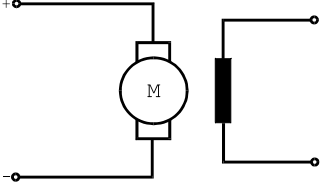
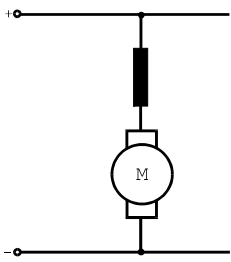
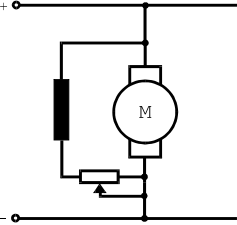
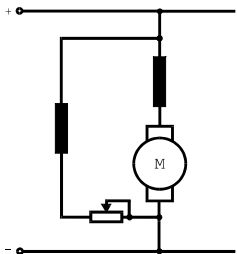
Si el devanado serie es contrario al campo shunt corre el riesgo de invertirse el sentido de giro en el arranque, así mismo con el aumento de carga la velocidad se vuelve excesiva.

El momento de torsión se mejora con el aumento de la corriente por la armadura.

El vacío o con poca carga se comporta como un shunt, mientras para cargas grandes predomina el efecto del serie.

Se aplica en equipos de elevación y donde se requiere no tener el problema de embalamiento que tiene el serie

### Resumen de características principales de motores de corriente continúa

Excitación	Esquema	Características principales
Independiente		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Par de arranque muy elevado.</li> <li>- Características muy similares al motor derivación.</li> <li>- Motor bastante estable.</li> <li>- Fácil control de su velocidad de forma automática.</li> <li>- Imprescindible reostato de arranque.</li> <li>- Utilizado en motores de pequeña, media y gran potencia.</li> </ul>
Serie		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Par de arranque muy elevado.</li> <li>- Muy inestable. Tendencia a embalsarse.</li> <li>- Imprescindible reostato de arranque.</li> <li>- Utilizado en tracción eléctrica.</li> </ul>
Paralelo		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Par de arranque menos elevado que el motor serie.</li> <li>- Motor muy estable.</li> <li>- Conviene colocar un reostato de arranque en el inducido.</li> <li>- Utilizado en máquinas herramienta por su estabilidad.</li> </ul>
Compuesta		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Buen par de arranque.</li> <li>- Muy estable. No se embala.</li> <li>- Precisa reostato de arranque.</li> <li>- Utilizado en máquinas herramientas y tracción.</li> </ul>

### Eficiencia de los motores de corriente continúa:

Para calcular la eficiencia de un motor de c.c. deben determinarse las siguientes pérdidas:

- Pérdidas del cobre
- Pérdidas de caída de voltaje en las escobillas
- Pérdidas mecánicas
- Pérdidas en el núcleo
- Pérdidas adicionales

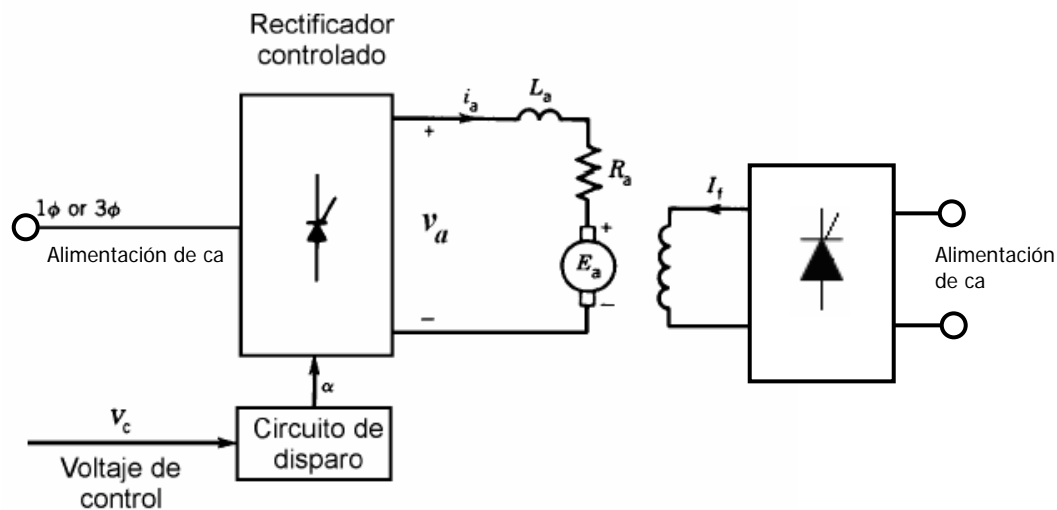
$$P_{salida} = P_{entrada} - P_{escobillas} - P_{Cu} - P_{nucleo} - P_{mecanicas} - P_{adicionales}$$

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \cdot 100\%$$

### Control de velocidad:

Los motores de corriente continua (c.c.) tienen características variables, pueden proporcionar un alto par motor de arranque y también permiten obtener control de la velocidad en un amplio rango. Los métodos de control de la velocidad, por lo general son más simples y menos costosos que los de los controladores de corriente alterna.

El desarrollo de la electrónica de potencia nos permite controlar eficientemente los motores de corriente continua, en la siguiente figura se aprecia el esquema de un control básico.



Control básico de motor, con rectificador controlado

### 3.6 Fundamentos de maquinas de C.A.

#### Ley de Faraday

El principio de funcionamiento del motor de una maquina rotativa, se basa en la ley de Faraday que indica "***en cualquier conductor que se mueve dentro del campo magnético de un imán generará una diferencia de potencial entre sus extremos, proporcional a la magnitud del campo y a la velocidad de desplazamiento***".

También se puede expresar que La fuerza electromotriz  $\mathcal{E}$  inducida en un circuito es igual a la variación del flujo magnético  $\Phi$  que lo atraviesa por unidad tiempo:

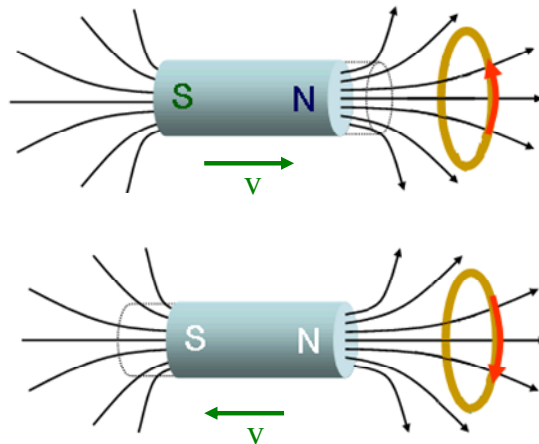
$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi}{dt}$$

La ley de faraday explica el valor de la fuerza electromotriz inducida, pero no su sentido, que fue investigado por Lenz

#### Ley de Lenz

El sentido de la corriente inducida es tal que genera un flujo que se opone a la variación que la produce.

El sentido de la corriente inducida se opone a la variación del flujo que la produce  $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$



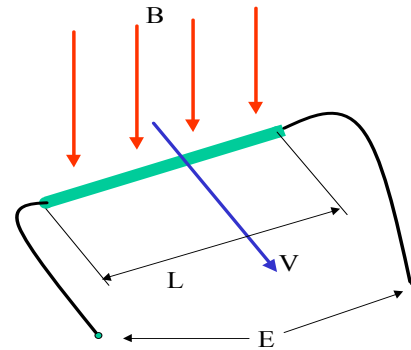
### Fuerza electromotriz inducida

La fem inducida en un conductor rectilíneo de longitud  $L$  que se mueve a una velocidad  $V$ , cuya dirección forma un ángulo  $\alpha$  con la dirección del campo magnético de inducción uniforme  $B$ , en cuyo interior se mueve cortando sus líneas de fuerza, tiene por valor:  $E = B \cdot L \cdot V \cdot \text{sen} \alpha$

Siendo:  $E$  : Tensión inducida  
 $B$  : Campo magnético  
 $L$  : Longitud del conductor  
 $V$  : Velocidad

Si las tres magnitudes son perpendiculares, entonces el valor de la fem es:

$$E = B \cdot L \cdot V$$



En términos prácticos, si tenemos un conductor de longitud  $L$ , que se mueve a una velocidad  $V$ , y sobre el mismo actúa un campo magnético  $B$  de dirección perpendicular al movimiento del conductor, se tiene por la ecuación anterior, que en los extremos de dicho conductor aparecerá una tensión inducida  $E$ , la cual será proporcional al producto vectorial entre  $B$ ,  $V$ , y a una constante  $L$ .

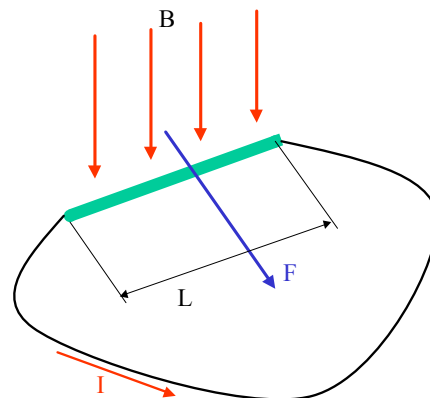
### Fuerza electromagnética

Si por un conductor que se mueve bajo la acción de un campo magnético constante, circula una corriente, aparecerá en dicho conductor una fuerza, cuya magnitud será proporcional al producto vectorial entre dicho campo magnético y el producto entre la corriente y la longitud de del conductor.

La ecuación que enuncia esto es:

$$F = (I \cdot L) \cdot B$$

Siendo:  
 $F$  : Fuerza  
 $I$  : Corriente por el conductor  
 $L$  : Longitud del conductor  
 $B$  : Campo magnético



Si ahora el conductor que teníamos antes, le unimos los extremos creando un circuito cerrado, aparecerá una corriente  $I$  a través de él, la cual dará origen, por la ecuación anterior, a una fuerza  $F$  que será proporcional al producto vectorial

entre esta corriente, multiplicada por la longitud del conductor, y el campo magnético.

Esta corriente que comienza a circular es producto de la relación entre la tensión inducida  $E$  en los extremos del conductor, y la resistencia del mismo, es decir:

$$I = \frac{E}{R_{\text{Conductor}}}$$

Por lo que:

$$F = (I \cdot L) \cdot B = \left[ \left( \frac{E}{R_{\text{Conductor}}} \right) \cdot L \right] \cdot B$$

De donde se desprende que la fuerza originada  $F$  es proporcional a dos constantes ( $R$ , resistencia del conductor y  $L$ , longitud del mismo), a la tensión inducida  $E$  y al campo magnético  $B$  que actúa sobre el conductor.

Volviendo a la ecuación original:

$$F = (I \cdot L) \cdot B$$

Se tiene otra vez que es un producto vectorial, ya que esta fuerza depende siempre del ángulo que forman el vector corriente y el vector campo magnético. Si este ángulo es  $0^\circ$ , ambos vectores son paralelos, no hay generación de fuerza.

La fuerza es máxima cuando este ángulo es  $90^\circ$  (vectores de  $I$  y  $B$  perpendiculares).

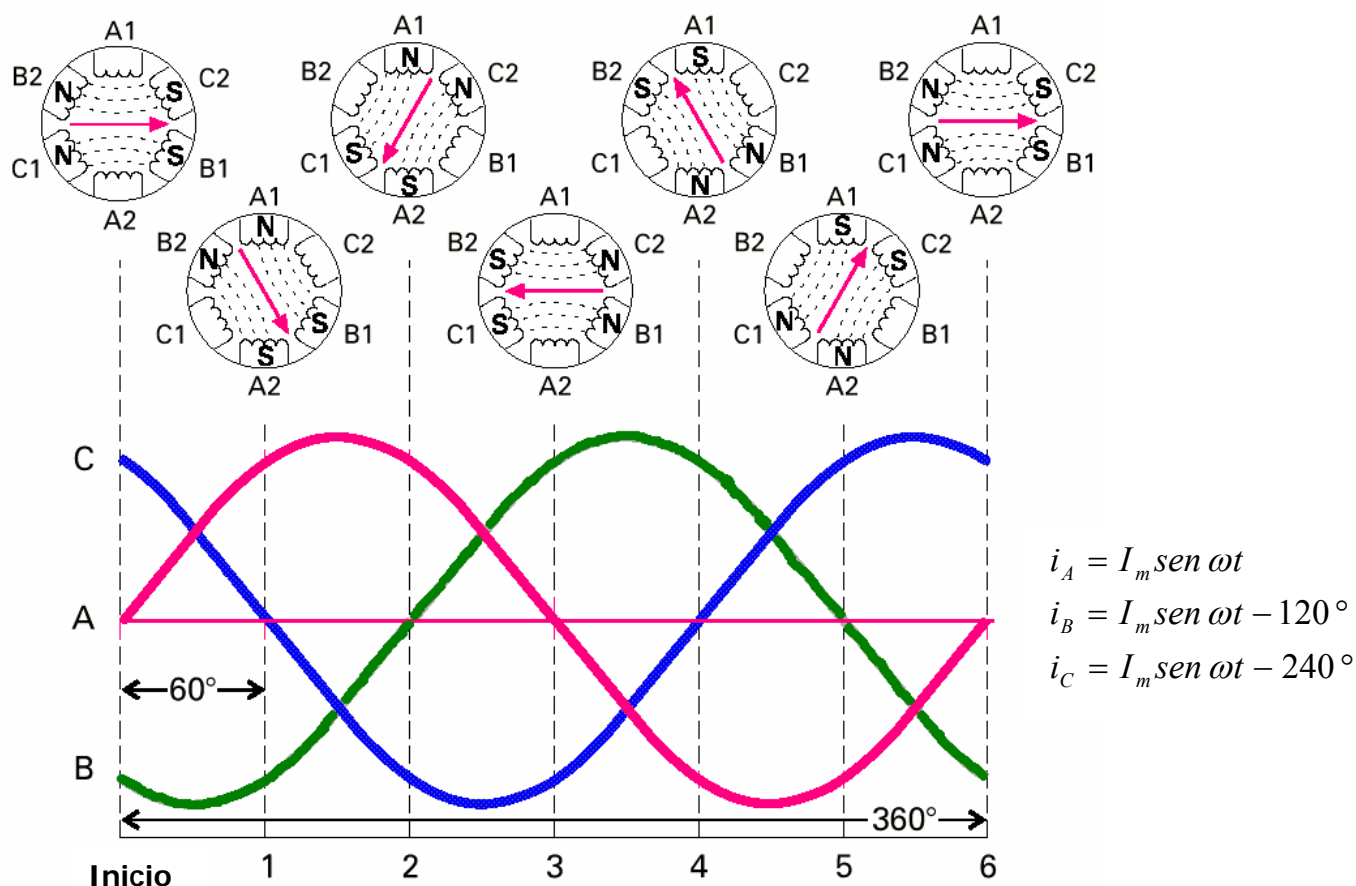
### **Campo magnético giratorio**

Un principio básico de funcionamiento de las maquinas de ca esta basada en la creación de un campo magnético giratorio.

A este campo giratorio lo crean tres arrollamientos iguales, ubicados en la periferia del estator pero desfasados  $120^\circ$  (físicos) uno del otro. Además, la tensión aplicada a estos tres arrollamientos, es una tensión senoidal, pero desfasada  $120^\circ$  eléctricos.

En la siguiente ilustración, por ejemplo, al inicio la corriente en la fase A es nula, la corriente en la fase B es negativa y la corriente en la fase C es positiva; B1 y el C2 son polos del sur mientras que B2 y C1 son Polos Norte. Las líneas magnéticas del flujo salen del polo norte B2 y entran en el polo del sur más cercano, C2. Las líneas magnéticas del flujo también salen del polo norte C1 y entran en el polo sur más cercano, B1. Resultando un campo magnético, según lo indicado por la flecha, marca el inicio de secuencia de generación de campo magnético giratorio.

La corriente trifásica que circula por el devanado del estator crea un campo magnético giratorio, de magnitud y velocidad constante, esta velocidad de giro tiene una velocidad sincrónica.



### 3.7 Generadores sincrónicos

Los generadores sincrónicos son máquinas rotativas, los encargados de transformar la energía mecánica en energía eléctrica. Estas máquinas están constituidas de circuitos magnéticos y circuitos eléctricos. El circuito magnético lo constituyen el núcleo del estator, el núcleo del rotor, el entrehierro, el devanado trifásico y el devanado de campo (devanado de excitación).

El rotor del generador va acoplado a la turbina (motor primario), entregándole esta la potencia mecánica necesaria (a una velocidad constante), que será convertida a potencia eléctrica. El medio que se emplea para el proceso de conversión de la energía es el campo magnético. Este campo es creado producto de la corriente de excitación en el arrollamiento del rotor, y gira a la velocidad del rotor induciendo una tensión alterna trifásica en el devanado del estator.

La frecuencia de la tensión inducida en el estator, depende de la velocidad en forma directa; quiere decir que a mayor velocidad del rotor, mayor es la frecuencia de la tensión generada.

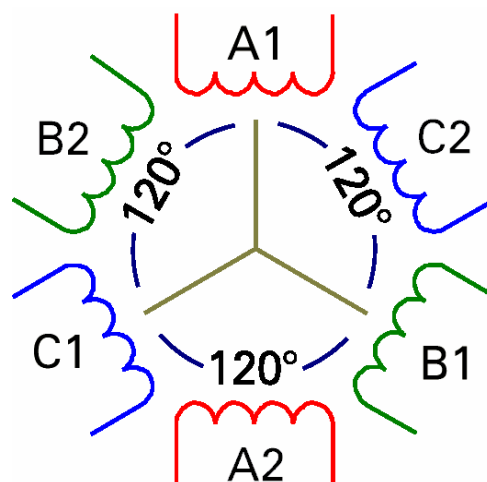
En otras palabras, se tienen dos circuitos eléctricos, uno de corriente continua en el rotor, llamado circuito de campo y otro trifásico en el estator. El primero es de baja potencia y de baja tensión, en cambio el segundo es el que maneja gran potencia a tensiones elevadas del orden de las decenas de KV.

Las partes fundamentales son el estator y el rotor:

ESTATOR O ARMADURA constituido por un devanado trifásico uniformemente distribuido a  $120^\circ$ .



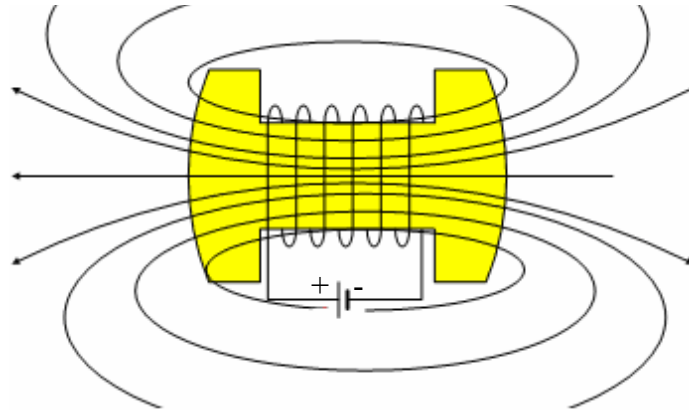
Estator de máquina sincrónica



Devanado estator distribuido a  $120^\circ$



El ROTOR es, un electroimán que puede ser de polos salientes o de polos lisos, cuyo arrollamiento se alimenta con corriente continua, tiene gran cantidad de espiras.



Los generadores sincrónicos se pueden clasificar de acuerdo a la forma de sus rotores en:

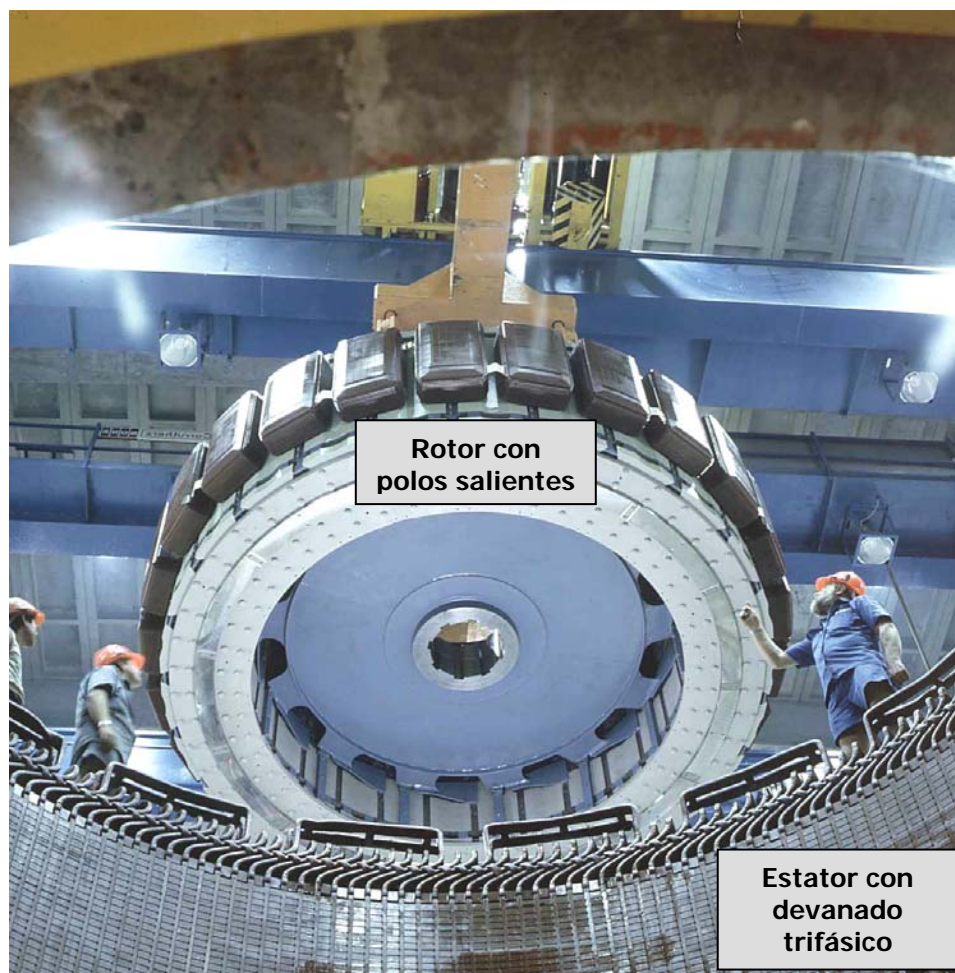
- Generadores de polos salientes.
- Generadores de polos lisos.

**Generadores de polos lisos.**- Este tipo de generadores es de dos o cuatro polos, movidos por turbinas de alta velocidad, de allí que se les conozca como turboalternadores. El rotor presenta un diámetro de menor longitud que la longitud axial. El entrehierro es uniforme, por lo que reactancia de la máquina se considera uniforme, e igual a la reactancia directa ( $X_d$ ).



Generador de polos lisos

**Generadores de polos salientes.**- Los rotores son de gran cantidad de polos, movidos por turbinas hidráulicas que giran a bajas velocidades. El rotor se caracteriza por presentar un entrehierro no uniforme, asimismo el diámetro del rotor es mayor que la longitud axial, tal como se muestra en la figura siguiente. La línea que pasa por el eje magnético se le conoce como eje directo, y a la línea imaginaria que pasa perpendicularmente al eje magnético se le conoce como eje de cuadratura. Como el entrehierro no es uniforme se tienen dos reactancias, conocidas como reactancia de eje directo ( $X_d$ ) y reactancia de eje de cuadratura ( $X_q$ ).



Generador de polos salientes

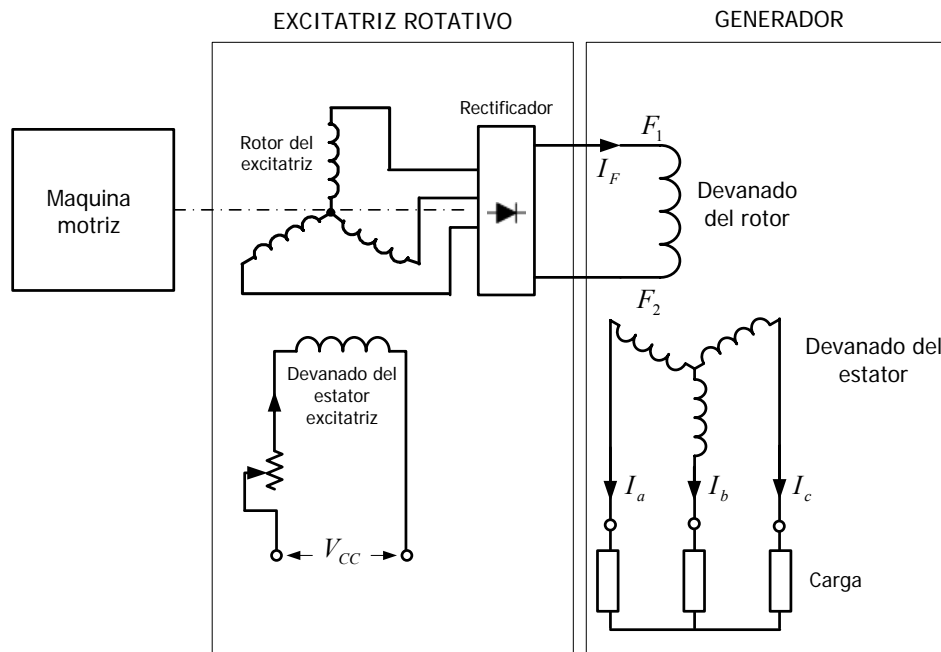


Diagrama de excitatriz rotativo con generador sincrónico

### Principio de funcionamiento del generador sincrónico:

El rotor es alimentado con corriente continua a través del excitatriz rotativo produciendo un campo  $B_R$  constante.

Al girar el rotor impulsado por la máquina motriz el campo  $B_R$  gira a la misma velocidad.

El campo giratorio  $B_R$  induce tensiones trifásicas en el estator con una frecuencia:

$$f = \frac{P \omega_R}{2\pi}$$

$f$  : Frecuencia de las tensiones inducidas en el estator.

$\omega_R$  : Velocidad de giro del rotor.

$P$  : Número de pares de polos.

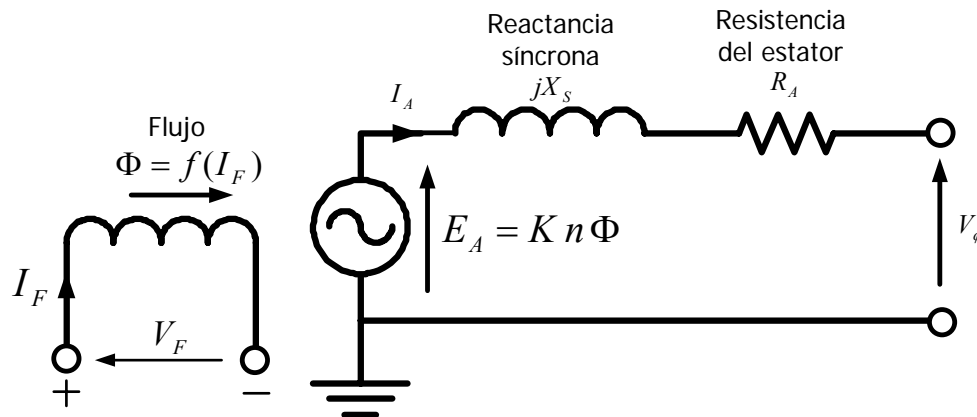
Al conectar carga trifásica circulan corrientes trifásicas por el devanado del Estator, aparece un campo giratorio de reacción del estator; el campo giratorio producido por las corrientes del estator es el campo de reacción del inducido  $B_s$ . Devanado inductor (el que induce las tensiones) es el rotor.

Devanado inducido (donde se inducen las tensiones) es el estator.

El campo resultante es la suma del campo excitador producido por el rotor y del campo de reacción del inducido.

### Circuito equivalente monofásico

El circuito equivalente monofásico del generador es un circuito thévenin, formado por una fuente ( $E_A$ ) y una impedancia en serie ( $Z_S = jX_S + R_A$ ).



Circuito equivalente monofásico

Donde:

- $E_A$  : Tensión generada por fase.
- $V_\phi$  : Tensión en terminales por fase.
- $R_A$  : Resistencia de armadura.
- $jX_S$  : Reactancia sincrónica.
- $I_A$  : Corriente de armadura.
- $I_F$  : Corriente de excitación.
- $V_F$  : Tensión de excitación.
- $n$  : Velocidad de rotación, igual a la velocidad sincrónica ( $n_S$ ).
- $\Phi$  : Flujo principal (flujo de campo).
- $K$  : Constante que depende del aspecto constructivo de la máquina (# de polos, número de bobinas, etc.).

Como se indica en la última relación, la tensión generada por fase ( $E_A$ ), depende del flujo magnético ( $\Phi$ ), de la velocidad de rotación ( $n$ ) y de los parámetros constructivos de la máquina ( $K$ ). Aplicando la 2da. Ley de Kirchhoff, tenemos en el circuito equivalente monofásico tenemos:

$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A$$

Reactancia sincrónica = reactancia dispersión estator+ efecto de reacción de inducido

## Diagrama fasorial

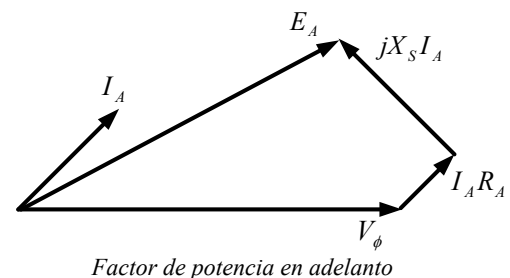
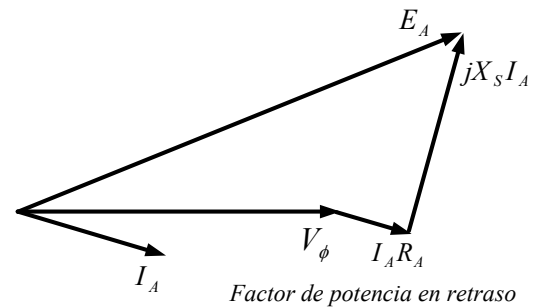
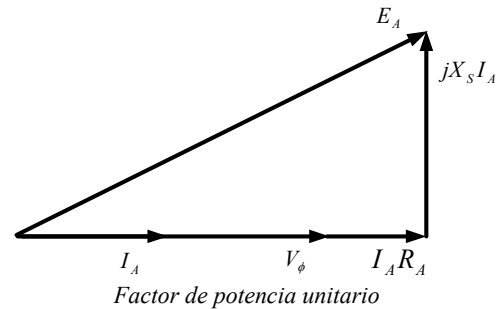
Cuando el generador síncrono trabaja en vacío el único flujo existente es el producido por la corriente continua de excitación del rotor. Cuando suministra corriente a una carga, dicha corriente produce un campo magnético giratorio al circular por los devanados del estator. Este campo produce un par opuesto al de giro de la máquina, que es necesario contrarrestar mediante la aportación exterior de potencia mecánica.

El flujo total de la máquina se verá disminuido o aumentado dependiendo que la carga sea inductiva o capacitiva

A este efecto creado por el campo del estator se le conoce con el nombre de *"reacción de inducido"*

**PARA UNA MISMA TENSIÓN DE SALIDA EL GENERADOR PUEDE CEDER O ABSORBER POTENCIA REACTIVA DEPENDIENDO DE QUE LA CARGA SEA INDUCTIVA O CAPACITIVA**

Para conseguirlo basta modificar el valor de la  $E_A$  (modificando el campo de excitación  $I_F$ )



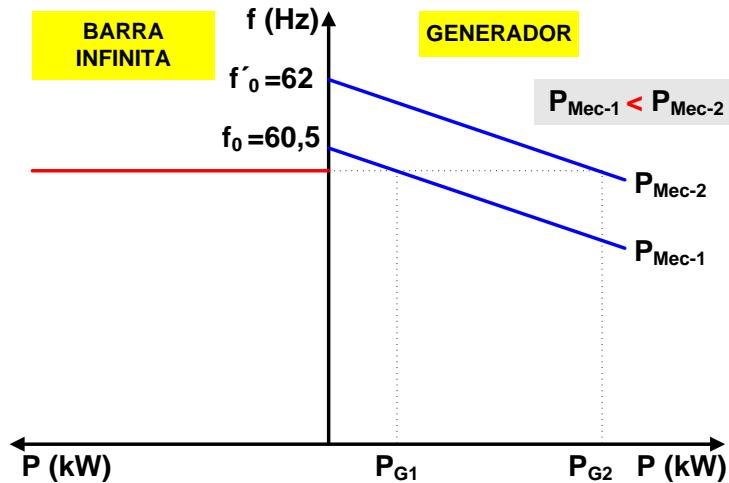
## Puesta en paralelo

Para poner en paralelo un generador síncrono a una barra infinita, debe de:

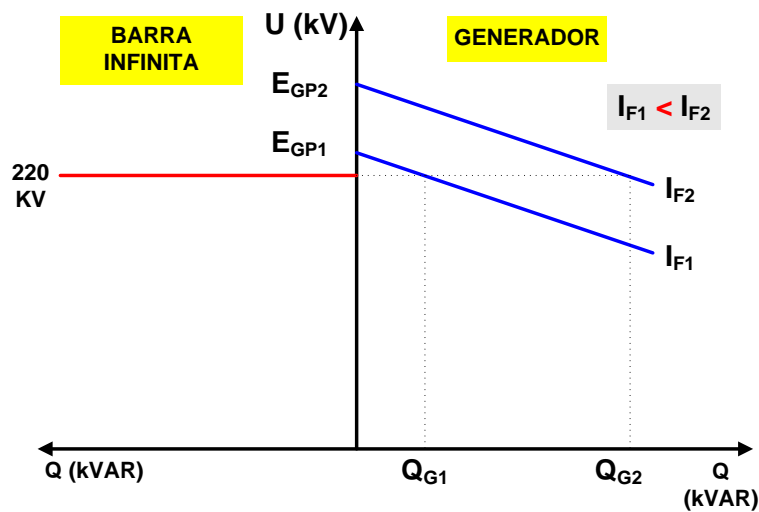
- Previamente se debe haber verificado igualdad de secuencia de fases.
- Llevar la velocidad de la turbina a la velocidad síncrona.
- Luego cerrar el circuito de campo, e incrementar la corriente de campo ( $I_F$ ) hasta obtener en bornes la tensión nominal.
- Mediante un doble voltímetro y doble frecuencímetro, verificar que las tensiones del generador y de la barra infinita sean iguales en magnitud y frecuencia. Luego cuando estén en fase (verificando en el sincronoscopio) ambas tensiones, cerrar el interruptor de potencia.

### Generador en paralelo a una barra infinita

Si se incrementa el ingreso de potencia mecánica ( $P_{Mec}$ ) de entrada en la turbina, se incrementa la potencia generada ( $P_G$ ), manteniéndose la velocidad.

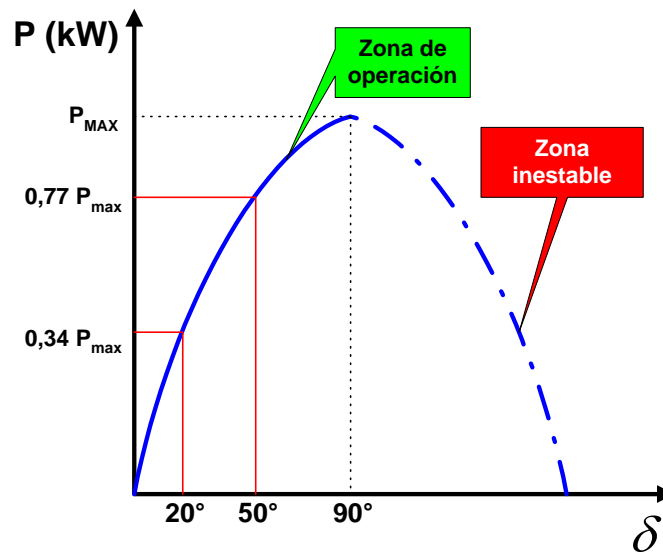


Si se incrementa la corriente de excitación ( $I_F$ ), la tensión no se incrementa, pero si la potencia reactiva generada ( $Q_G$ ).



### Ecuación potencia-ángulo

Cuando la potencia de la carga aumenta, el desfase angular entre el eje magnético del campo creado por el rotor y el eje magnético del campo creado por el estator (ángulo de potencia  $\delta$ ), se incrementa.



$$P = \frac{3 \cdot E_A \cdot V_\phi}{X_S} \cdot \text{Sen}(\delta)$$

### 3.8 Motores sincrónicos

Los motores eléctricos son máquinas sincrónicas que se usan para convertir potencia eléctrica en potencia mecánica, es el mismo que un generador sincrónico en todo sus aspectos, con la diferencia que la dirección del flujo de potencia tiene sentido contrario.

- Cuenta con dos tipos de alimentación, uno trifásico para el devanado del estator y el otro DC para el devanado del rotor.
- La alimentación trifásica sirve para la conversión de la potencia eléctrica en potencia mecánica y para ciertas condiciones de operación para magnetizar la máquina.
- Esencialmente la alimentación DC es para magnetizar la máquina.
- El motor sincrónico no tiene par de arranque propio. Por eso, en el diseño de éstos motores, hay que incluir algún tipo de dispositivo, o sistema, de arranque.
- Tres son los métodos básicos que pueden usarse para arrancar un motor sincrónico:
  - Reducir la velocidad del campo magnético giratorio.

- Empleando un motor primo externo.
- Usando devanados amortiguadores.

### Arranque empleando convertidor de frecuencia

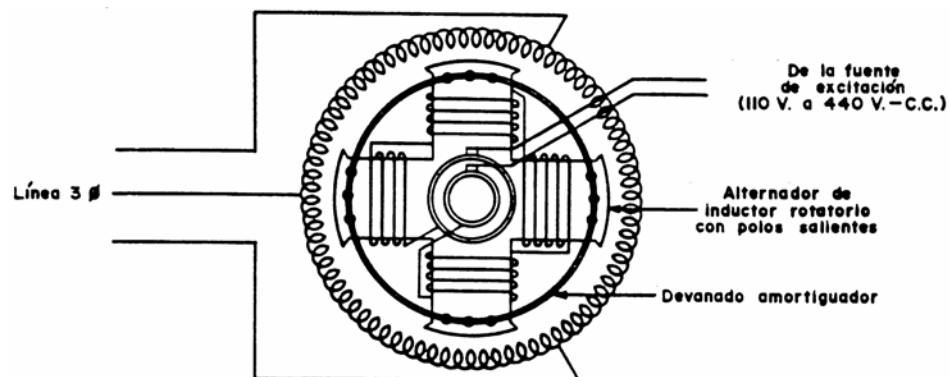
- Si la velocidad sincrónica es suficientemente baja, no habrá problema para que el rotor acelere y se enganche con el campo magnético del estator.
- La velocidad sincrónica se puede aumentar gradualmente incrementando la frecuencia hasta obtener su velocidad nominal.
- La variación de la frecuencia se consigue con la ayuda de un convertidor de frecuencia.

### Arranque empleando motor primo

- Se acopla un motor primo externo y se lleva mediante este al motor sincrónico a la velocidad sincrónica. A ésta velocidad el motor se sincroniza con la red mientras que se desacopla el motor primo.
- Como el motor se arranca sin carga, el motor primo puede ser de una potencia mucho menor que la del motor sincrónico.

### Arranque empleando el devanado amortiguador

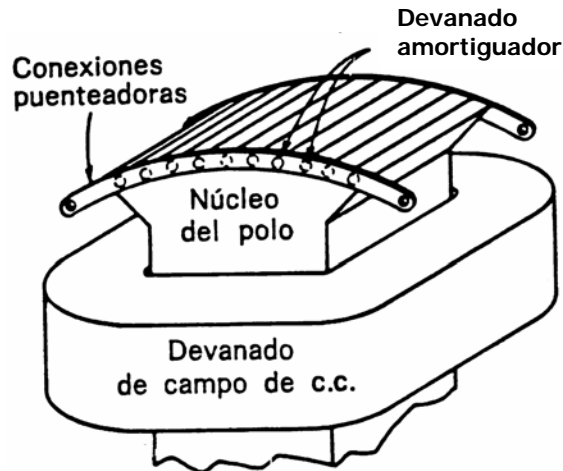
- Es la forma más popular, donde las barras del devanado amortiguador hacen el papel de jaula de ardilla, proporcionando el momento de torsión de arranque, de aceleración y torsión mínima.
- En el arranque, de preferencia la máquina no debe de tener carga, pues, su sección transversal es relativamente pequeña, y se sobrecalentará si se le aplica carga haciéndole operar como motor de inducción con carga.
- Cuando el rotor alcanza la velocidad máxima a la que puede acelerar como el tipo en jaula de ardilla (aproximadamente 95 %, o más, de la velocidad sincrónica), se aplica corriente continua al campo del rotor.





### Devanado amortiguador

- El devanado amortiguador, también sirve para mantener el sincronismo de la máquina ante oscilaciones bruscas de carga.



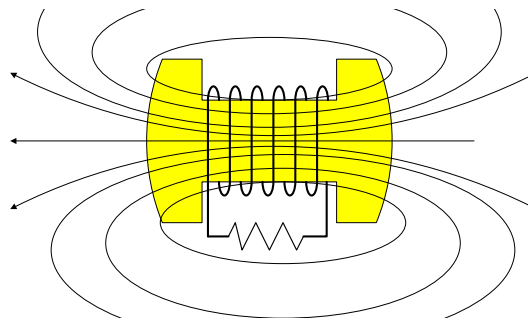
**Polo magnético con devanado amortiguador**

### Tensión inducida

**IMPORTANTE:** En el instante del arranque, el campo magnético giratorio creado por el devanado  $3\phi$  del estator, cortará a los devanados del rotor, (que están estacionarios) como en un transformador, y si no se toman precauciones, se pueden producir sobrevoltajes que dañen al aislante. Cabe indicar que el bobinado del rotor tiene gran cantidad de espiras (vueltas).

### Solución

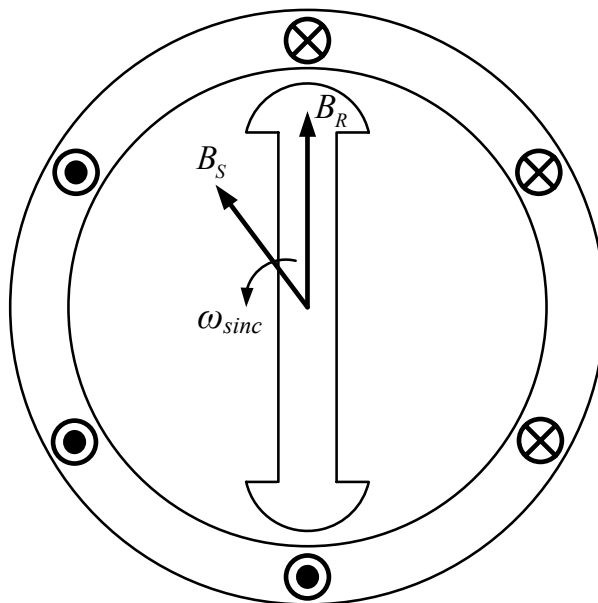
Si el devanado de campo del rotor se encuentra en cortocircuito, o conectado a una resistencia de descarga, durante el proceso de arranque; no se presentarán éstas sobrevoltajes.



**Devanado de campo con resistencia de descarga**

### Principio de funcionamiento

La corriente  $I_F$  del motor produce un campo magnético  $B_R$  constante. Un sistema de voltaje trifásico se aplica al estator de la maquina, el cual producirá un campo magnético rotativo uniforme  $B_S$ . Por tanto hay dos campos magnéticos en la maquina y el **campo del rotor  $B_R$  tendera a alinearse con el campo del estator  $B_S$** , como dos barras imanadas trataran de alinearse si se encuentran una cerca de la otra. Puesto que el campo magnético del estator esta girando a una velocidad síncrona, el campo magnético del rotor (el rotor mismo) constantemente tratara de alcanzarlo. Cuanto mas grande sea el ángulo entre los dos campos magnéticos (hasta un cierto limite), mayor es el momento de torsión sobre el rotor de la máquina. ***El principio básico de funcionamiento de un motor síncrono es que el rotor de la máquina cace al campo magnético giratorio del estator alrededor de un círculo, sin que llegue a alcanzar.***



### Momento de torsión

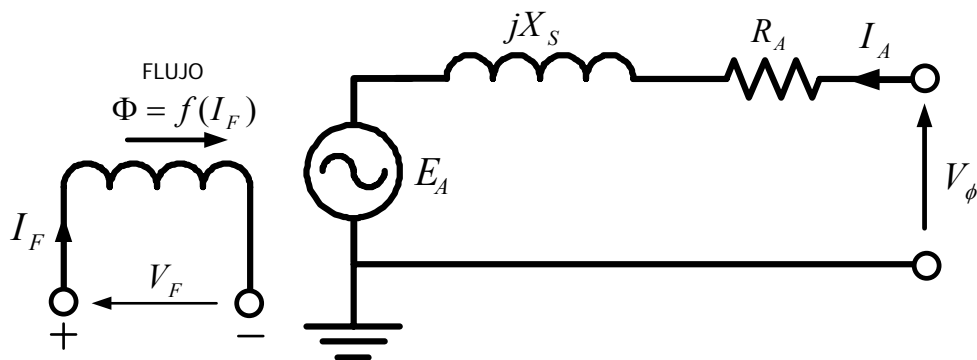
$$T_{ind} = k \cdot B_R \cdot B_S$$

(En sentido contrario al de las manecillas del reloj).

**Motor síncrono de dos polos**

### Circuito equivalente

Un motor síncrono es lo mismo que un generador síncrono en todos sus aspectos, con la diferencia que la dirección del flujo de corriente tiene sentido contrario.



Circuito equivalente por fase

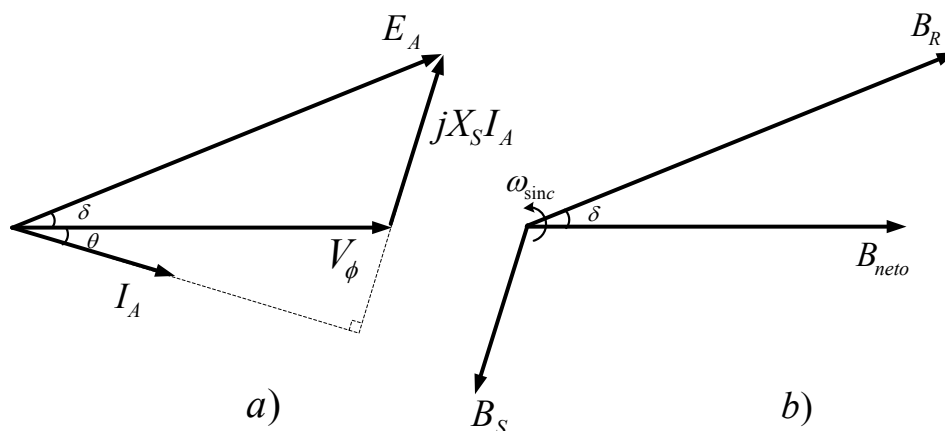
Por el cambio de dirección de  $I_A$ , la ecuación de la ley de voltajes de Kirchhoff para el circuito equivalente también cambia. Si escribimos esta ecuación para el nuevo circuito equivalente, tendremos.

$$V_\phi = E_A + jX_S I_A + R_A I_A$$

$$E_A = V_\phi - jX_S I_A - R_A I_A$$

### El motor sincrónico desde la perspectiva del campo magnético

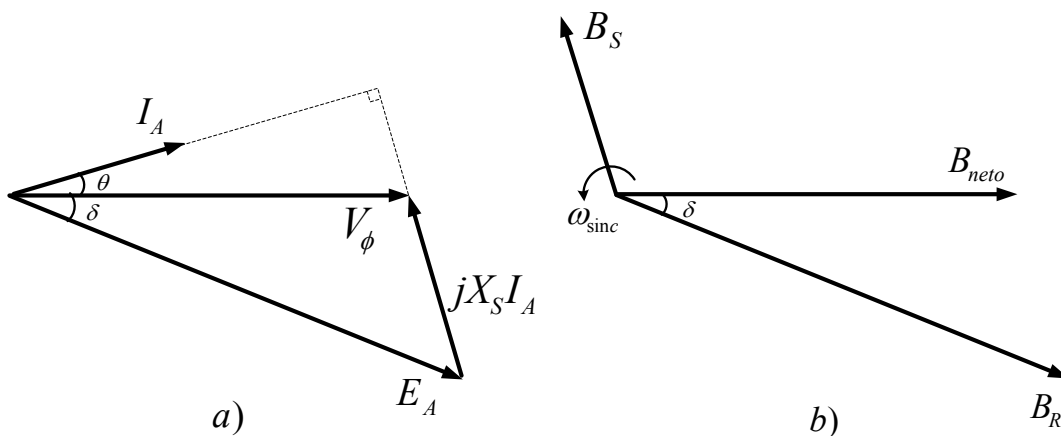
Según el diagrama fasorial de generador, trabajando con una corriente de campo grande, como se ilustra en la siguiente figura.  $B_R$  Corresponde a (produce)  $E_A$ ,  $B_{neto}$  corresponde a (produce)  $V_\phi$  y  $B_S$  corresponde a  $E_{stat}$  ( $= -jX_S I_A$ ). La rotación, tanto del diagrama fasorial como del diagrama de campo magnético, es contraria a las manecillas del reloj.



- a) Diagrama fasorial de un generador sincrónico que funciona con un factor de potencia en retraso. b) Diagrama de campo magnético correspondiente.

La diferencia básica entre el funcionamiento del motor y del generador en las maquinas sincrónicas puede verse, en el diagrama de campo magnético o bien en el diagrama fasorial. *En un generador*,  $E_A$  se localiza delante de  $V_\phi$  y  $B_R$  delante de  $B_{neto}$ . *En un motor*,  $E_A$  se localiza detrás de  $V_\phi$  y  $B_R$  detrás de  $B_{neto}$ .

*En un motor*, el momento de torsión inducido esta en la dirección del movimiento y en un *generador* el momento de torsión inducido es un momento de torsión antagónico, contrario a la dirección del movimiento.



a) Diagrama fasorial de un motor sincrónico. b) Diagrama de campo magnético correspondiente.

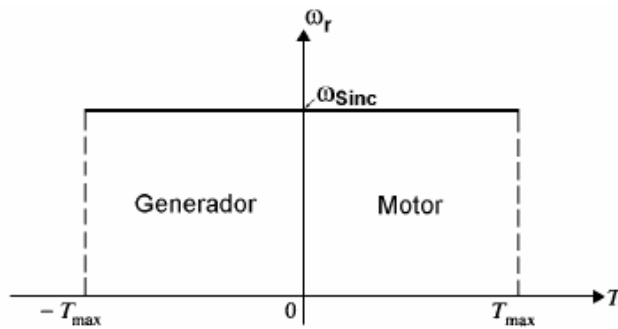
### Curva característica de velocidad-momento de torsión

Los motores sincrónicos suministran potencia a cargas que son básicamente aparatos de velocidad constante. Esto significa que la tensión en los bornes y la frecuencia del sistema serán constantes independientemente de la cantidad de potencia que toma el motor.

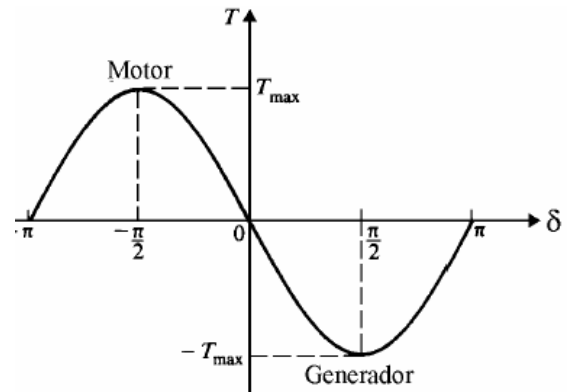
La velocidad de rotación esta ligada a la frecuencia eléctrica, por lo cual la velocidad del motor será constante e independiente a la carga. La velocidad de condición estable del motor permanece desde vacío hasta llegar al máximo momento de torsión ( $T_{max}$ ) que el motor puede suministrar (**llamado momento de desenganche**). La ecuación del momento de torsión es

$$T_{ind} = k \cdot B_R \cdot B_{neto} \cdot \text{sen } \delta$$

$$T_{ind} = \frac{3 V_\phi E_A \text{sen } \delta}{\omega_m X_S}$$



Característica velocidad-momento de torsión de una maquina sincrónica.



Momento de torsión desarrollado por la maquina sincrónica

El momento de torsión máximo o momento de desenganche tiene lugar cuando  $\delta = 90^\circ$ . El momento de desenganche puede ser, en forma típica, tres veces el momento de plena carga de la maquina. Cuando el momento de torsión aplicado sobre el eje de un motor sincrónico excede el momento de desenganche, el rotor no puede permanecer ligado por mas tiempo al estator y a sus campos magnéticos netos; el rotor comienza a deslizarse por detrás de ellos. Mientras el rotor se frena, el campo magnético del estator lo "traspasa" repetidamente y la dirección del momento del inducido en el rotor se invierte con cada pasada. El enorme momento de torsión resultante que surge, primero en un sentido y luego en el otro, produce en todo el motor una vibración de gran magnitud. La perdida de sincronización después que el momento de desenganche se supera, se conoce como *polos deslizantes*.

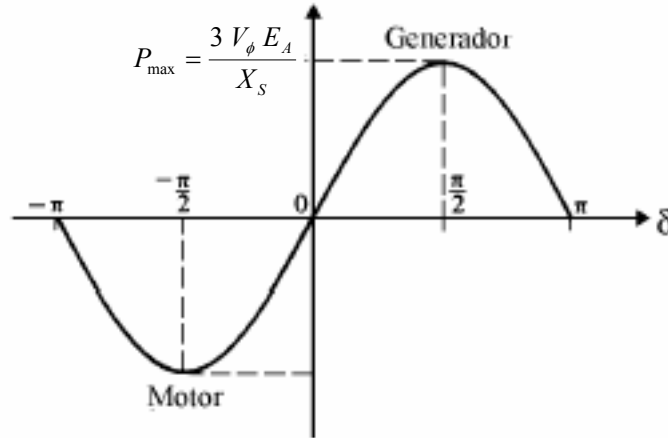
El momento máximo o momento de desenganche, se expresa por:

$$T_{\max} = k \cdot B_R \cdot B_{\text{neto}} \cdot \text{sen } \delta \qquad T_{\max} = \frac{3 V_\phi E_A \text{sen } \delta}{\omega_m X_S}$$

**Estas ecuaciones indican que cuanto más grande sea la corriente de campo (y en consecuencia  $E_A$ ), mayor es el momento máximo del motor.**

Hay, por tanto, una estabilidad mayor para trabajar el motor con una corriente de campo grande o una  $E_A$  grande.

La máxima potencia posible que una maquina puede producir es:



### Efecto de los cambios de carga en un motor sincrónico

Si la carga sobre el eje del motor aumenta, el rotor desacelerará al comienzo, lo cual hace que tanto el ángulo  $\delta$  como el momento inducido aumenten. El aumento en el momento inducido eventualmente acelerará el rotor y el motor girará de nuevo a la velocidad de sincronismo, pero con un ángulo de momento de torsión mayor que el que tenía inicialmente.

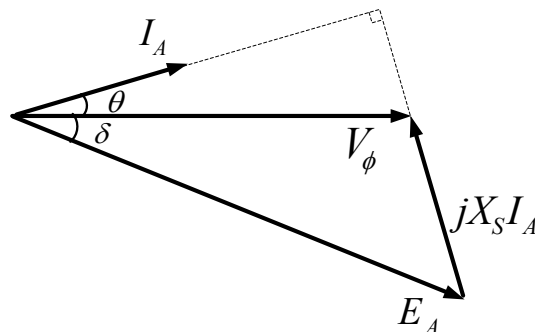
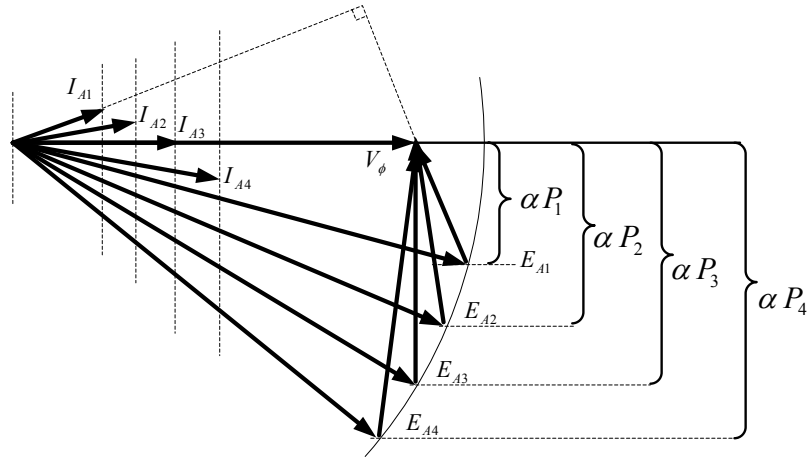


Diagrama vectorial de un motor que trabaja con un factor de potencia en adelante.

El voltaje generado internamente  $E_A$  es igual a  $K\Phi\omega$  y por ello solo depende de la corriente de campo y la velocidad de la maquina. La velocidad esta obligada a permanecer constante por la fuente de la potencia de entrada y como no se ha alterado el circuito de campo, asimismo la corriente de campo se mantiene constante. **Entonces  $E_A$  debe ser constante mientras la carga se modifica.**

Las distancias proporcionales a la potencia ( $E_A \text{ sen } \delta$  y  $I_A \text{ cos } \theta$ ) aumentaran, pero la magnitud de  $E_A$  debe permanecer constante. Mientras la carga aumenta,  $E_A$  se desplaza hacia abajo alejándose mas y mas, la magnitud  $jX_S I_A$  tiene que aumentar para llegar de la punta de  $E_A$  hasta  $V_\phi$  y entonces la corriente del inducido  $I_A$  también se aumentará. Observamos que el ángulo de factor de potencia  $\theta$  también cambia, volviéndose menos y menos en adelanto, luego mas y mas en retraso.



Efecto del aumento de carga durante el funcionamiento de un motor sincrónico.

### Efecto de los cambios de la corriente de campo en un motor sincrónico

Un aumento en la corriente de campo, aumentara la magnitud de  $E_A$ , pero no afecta la potencia real entregada por el motor. La potencia entregada por este cambia únicamente cuando el momento de torsión de la carga sobre el eje cambia.

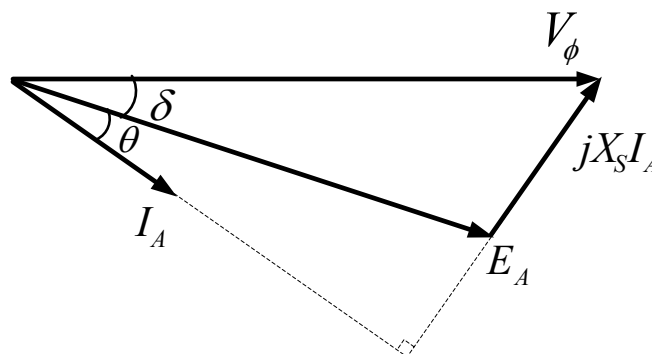
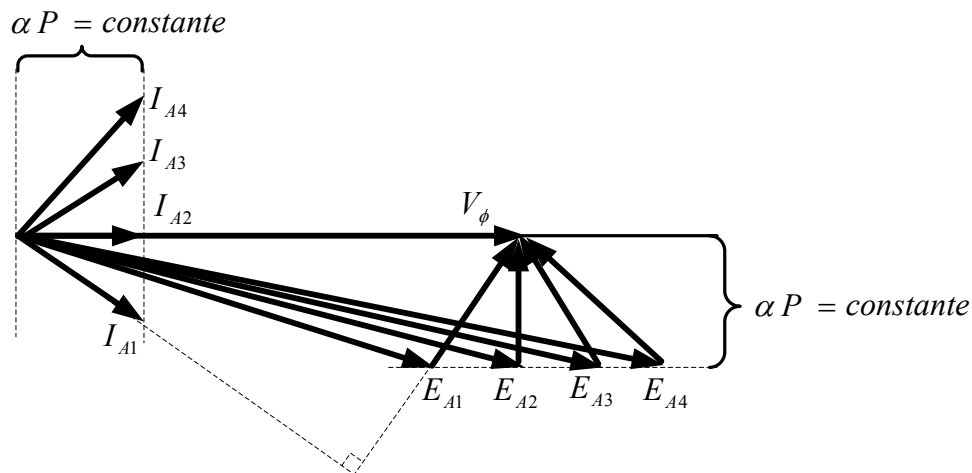


Diagrama vectorial de motor sincrónico que funciona con un factor de potencia en retraso.

Como un cambio en  $I_F$  no afecta la velocidad del eje  $n_m$  y como la carga acoplada al eje no se modifica, la potencia real suministrada es también constante. Por supuesto,  $V_\phi$  también es constante, porque la fuente de potencia que alimenta el motor lo mantiene constante. Las distancias proporcionales a las potencia en el diagrama vectorial ( $E_A \text{ sen} \delta$  y  $I_A \text{ cos} \theta$ ) deben, por tanto, ser constantes. Cuando la corriente de campo aumenta,  $E_A$  debe incrementarse, pero solo puede hacerlo desliziéndose a lo largo de la línea de potencia constante.

A medida que el valor de  $E_A$  aumenta, la magnitud de la corriente del inducido  $I_A$ , disminuye primero y luego aumenta nuevamente. Para  $E_A$  con un valor pequeño, la corriente del inducido  $I_A$  esta en retraso y el motor es una carga inductiva. Esta actuando como una combinación de carga inductiva-resistiva absorbiendo potencia reactiva  $Q$ . Como la corriente de campo aumenta, la corriente del inducido se alinea eventualmente con  $V_\phi$  y el motor parece meramente resistivo. Si la corriente de campo aumenta aun mas, la corriente de inducido se torna adelantada y el motor se vuelve una carga capacitiva. Ahora actúa como una combinación capacitiva - resistiva absorbiendo potencia reactiva negativa  $-Q$  ó, alternativamente, suministrando potencia reactiva al sistema.

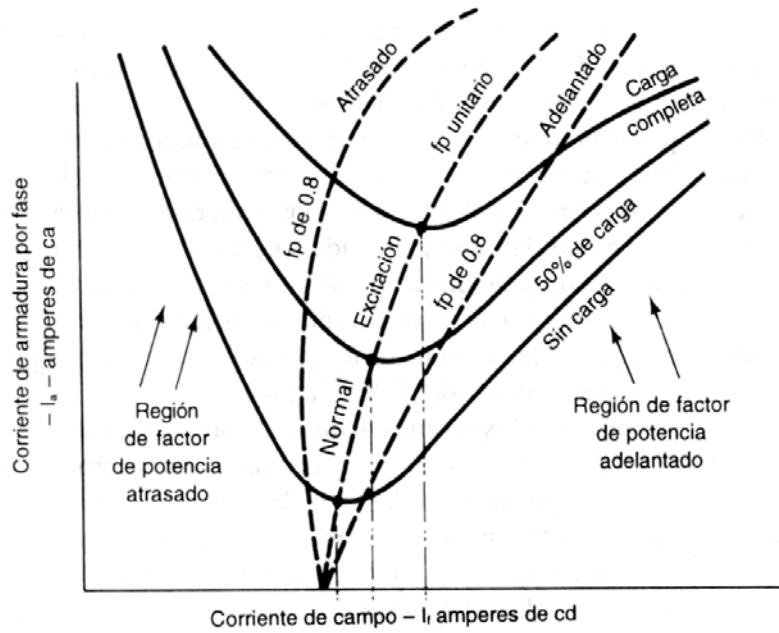


Efecto de aumento en la corriente de campo en el funcionamiento de un motor

En la siguiente figura puede verse una grafica de  $I_A$  versus  $I_F$  de una maquina sincrónica. Tal grafico se denomina **curva V de un motor sincrónico**.

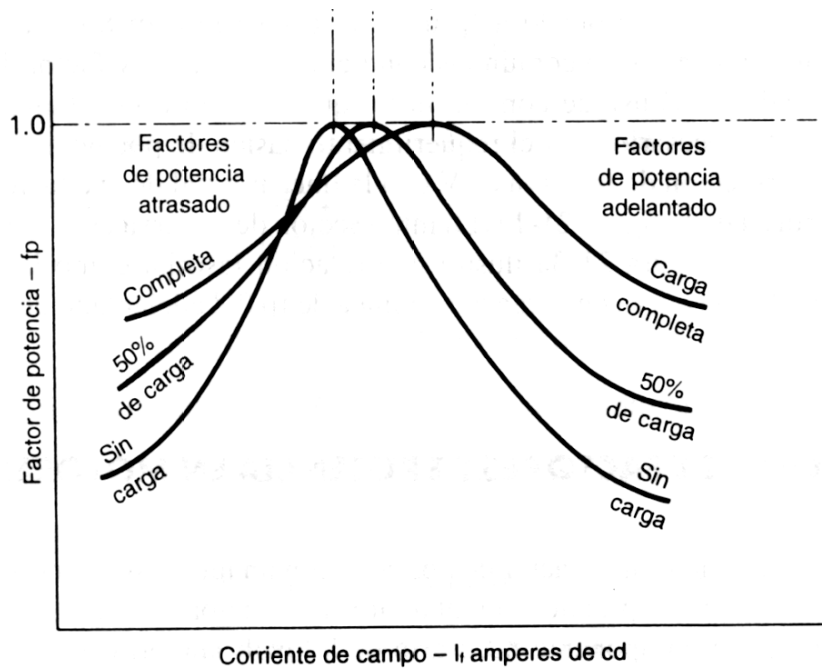
Apreciamos como variando la corriente de excitación cambia la corriente de línea en el motor.





(a) Corriente de armadura vs. corriente de campo

Quando el motor está subexcitado se comporta como una carga inductiva y si está sobrexcitado se comporta como un capacitor, siendo su  $\cos \phi$  máximo de 1.



(b) Factor de potencia vs. corriente de campo

### Condensador sincrónico

Algunos motores sincrónicos se venden específicamente para la corrección del factor de potencia. Estas maquinas tienen ejes que no sobrepasan del armazón del motor, o sea que ninguna carga se les podría acoplar. Tales motores sincrónicos de destinación específica se han denominado frecuentemente **condensadores sincrónicos**.

En la siguiente figura se ilustra el diagrama vectorial de un motor sincrónico que funciona sobreexcitado en vacío. Las distancias proporcionales a la potencia ( $E_A \sin \delta$  y  $I_A \cos \theta$ ) son cero. Como la ecuación de la ley de voltajes de Kirchoff para un motor sincrónico es:

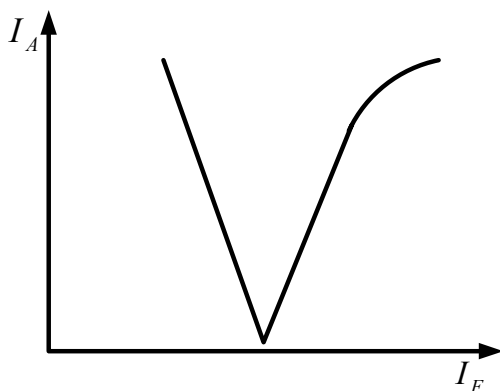
$$V_\phi = E_A + jX_S I_A$$

La magnitud de  $jX_S I_A$  señala hacia la izquierda y por lo tanto la corriente de inducido  $I_A$  señala hacia arriba.

Si  $V_\phi$  y  $I_A$  se examinan, la relación corriente – voltaje se asemeja a un condensador grande en el sistema de potencia.

Según la curva en V, la potencia real suministrada a la maquina es cero (con excepción a las perdidas), para el factor de potencia unitario la corriente  $I_A \approx 0$ .

Como la corriente de campo aumenta por encima de dicho punto, la corriente de línea (y la potencia reactiva suministrada por el motor) aumenta en forma casi lineal hasta que alcanza en punto de saturación.



Curva en V de un condensador sincrónico

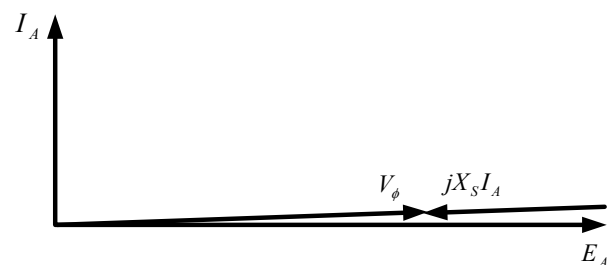
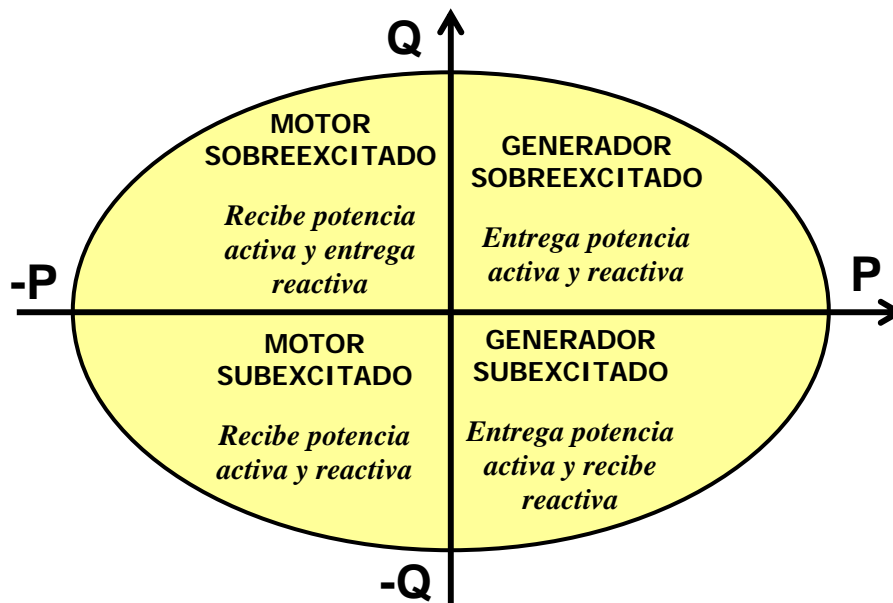


Diagrama vectorial de un condensador sincrónico

## Operación de máquinas sincrónicas



### Aplicaciones del motor sincrónico

Para cargas grandes de baja velocidad, fijas y velocidades constantes.

Por ejemplo:

- Compresores grandes de baja velocidad.
- Ventiladores y bombas.
- Muchos tipos de trituradores.
- Molinos.
- Diversos usos en la industria de la pulpa, papel, caucho, sustancias químicas, harina y laminadoras de metales.

### Ventajas

- *La más importante es que su velocidad es constante, ante variaciones de cargas.*
- *Otra, es su capacidad de operar, aún en condiciones de plena carga, a un factor de potencia en atraso, o en adelanto, el cual se puede ajustar fácilmente, al variar la excitación DC del devanado del rotor.*
- *En otras palabras, su factor de potencia puede ser cambiado a voluntad actuando sobre la excitación.*

### 3.9 Motores de inducción

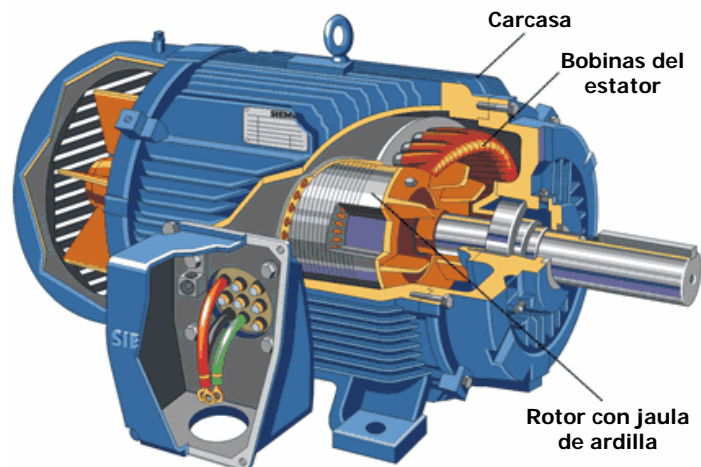
#### Introducción

Las máquinas de inducción son las más usadas en la industria gracias a su robustez, mínimos o nulos requerimientos de mantenimiento y menores costos de operación ya que pueden operar directamente conectadas a la red eléctrica (frecuencia y voltaje constante), permitiendo accionar cargas a una velocidad esencialmente constante. Cuando es usada con control por campo orientado puede alcanzar un control preciso tal como es encontrado en el motor de corriente continua además de entregar la posibilidad de operación en la zona de campo debilitado.

Algunas limitaciones tales como el ajuste de la característica par-velocidad, la intensidad de las corrientes durante el arranque, la regulación de velocidad y el rendimiento han sido resueltas o mejoradas con diseños ingeniosos o incorporando controladores electrónicos de potencia.

#### Aspectos constructivos

Un motor de inducción tiene físicamente el mismo estator que una máquina síncrona, con diferente construcción del rotor. Hay dos tipos diferentes de rotores de motor de inducción, que se pueden colocar dentro del estator; a uno se llama *rotor jaula de ardilla* o simplemente *rotor de jaula*, mientras que el otro se llama *rotor devanado*.



Corte de un típico motor de inducción

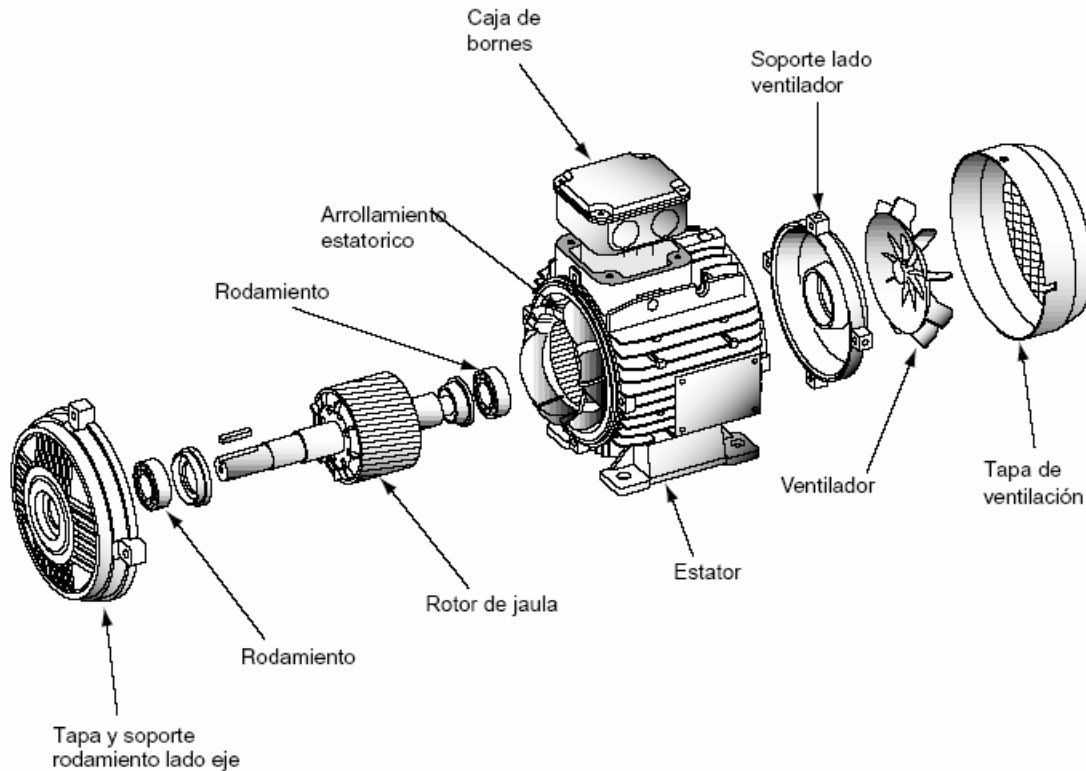
#### El estator

Es la parte fija del motor. Una carcasa de acero o aleación ligera rodea una corona de chapas delgadas (del orden de 0,5mm de grosor) de acero al silicio. Las chapas están aisladas entre sí por oxidación o mediante barnices aislantes. El laminado del circuito magnético reduce las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault. Las chapas tienen unas ranuras en las que se colocan los arrollamientos estatóricos destinados a producir el campo giratorio (tres arrollamientos en caso de un motor trifásico).

Cada arrollamiento está constituido por varias bobinas. La forma de conexión de estas bobinas entre sí determina el número de pares de polos del motor, y por tanto, su velocidad de rotación.

## El rotor

Es el elemento móvil del motor. Igual que el circuito magnético del estator, está constituido por un apilamiento de chapas finas aisladas entre sí y forman un cilindro claveteado alrededor del árbol o eje motor.



Despiece de un motor de inducción

## Características de funcionamiento de los motores de inducción

### Velocidad de sincronismo

A la velocidad del campo magnético giratorio se le denomina *velocidad de sincronismo* ( $n_s$ ) y es igual a:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} \text{ (rpm)}$$

Donde:

$f$  : Es la frecuencia del sistema.

$P$  : Es el numero de polos de la maquina.

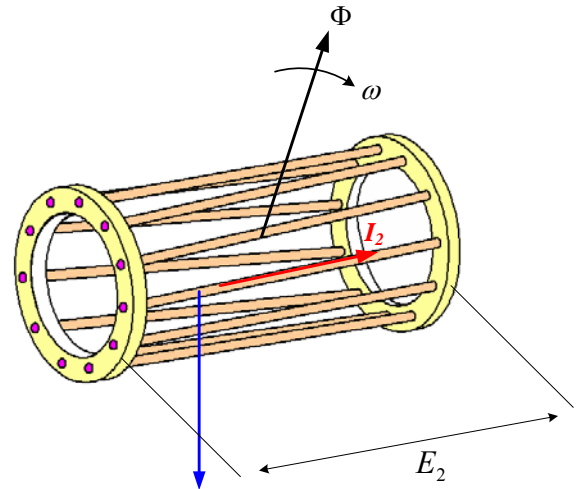
$n_s$  : Velocidad de sincronismo en RPM.

### Momento de torsión

El campo magnético giratorio  $\Phi$ , corta a las barras del rotor perpendicularmente. Esto induce una tensión  $E_2$  en dichas barras, y como las mismas están cortocircuitadas en sus extremos, crean un circuito cerrado, dando lugar a la circulación de una corriente  $I_2$ , que es la encargada de interactuar con el campo magnético del estator, produciendo una fuerza  $F$  ó momento de torsión, que es el que produce el movimiento del rotor.

El valor de momento de torsión viene dada por:

$$T_m = k \cdot \Phi \cdot I_2$$



Siendo:

$k$  = Constante en función de las dimensiones geométricas de la máquina

$\Phi$  = Flujo magnético del campo giratorio

$I_2$  = Intensidad de corriente del rotor

### Deslizamiento

La velocidad de giro del rotor del motor debe ser menor que la velocidad del flujo magnético  $\Phi$ , puesto que si tuviera misma velocidad, las barras del rotor no cortarían a las líneas del flujo y, por tanto, no se engendraría en ellas la FEM, resultando que la corriente en el rotor  $I_r$  será nula.

Debido a la resistencia del aire y al rozamiento, el rotor no llega a alcanzar la velocidad del flujo (velocidad de sincronismo), por lo que la **diferencia entre la velocidad de sincronismo y del rotor se denomina deslizamiento**.

$$s = n_s - n_r \quad \text{En tanto por ciento (\%) de } n_s \quad s = \frac{n_s - n_r}{n_s} (100)$$

Donde:

$s$  = Deslizamiento de la maquina

$n_s$  = Velocidad del campo magnético

$n_r$  = Velocidad del rotor

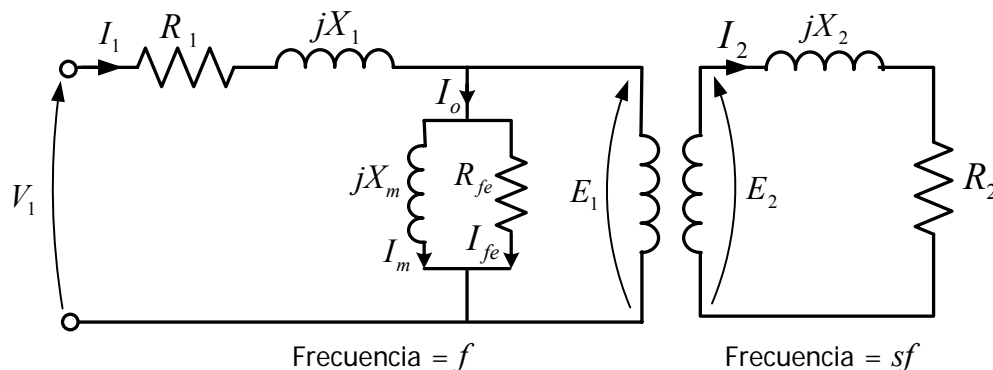
***El deslizamiento es prácticamente cero sin carga y es igual a 1 (ó 100%) cuando el rotor esta bloqueado.***

### **Circuito equivalente de motor de inducción**

En la búsqueda de un circuito equivalente que permita modelar al motor de inducción operando en estado estable, se aprovecha la similitud existente entre el principio de funcionamiento del motor de inducción y del transformador. En ambos casos en el circuito secundario (rotor en el caso del motor de inducción) se tienen tensiones y corrientes inducidas debidas al campo variable producido en el primario (estator). De hecho si a un motor de inducción rotor bobinado se mantiene con el rotor bloqueado (sin girar) y se miden las tensiones de estator para una determinada condición de "carga" en el rotor, se aprecia que están en relación del número de vueltas equivalentes de los bobinados. En condiciones de giro del rotor a una velocidad  $\omega_m$ , las tensiones y corrientes del rotor tienen ahora la frecuencia de deslizamiento. Si el motor de inducción esta en operación se tendrá un efecto adicional a los transformadores motivado por esta "transformación" de la frecuencia de estator a rotor.

Por conveniencia, se considera un motor de inducción rotor bobinado, para el caso jaula de ardilla, el circuito de rotor puede ser representado por un bobinado trifásico equivalente.

Si por el bobinado de estator y rotor circulan corrientes trifásicas, se generan campo magnético rotativo, que giran a la velocidad sincrónica en el entrehierro. Estas distribuciones de campo producen un campo magnético resultante que gira a la misma velocidad induciendo tensiones en ambos bobinados: en el estator a la frecuencia de la fuente  $f_1$  y en el rotor a la frecuencia de deslizamiento  $f_2 = sf_1$ .



**Modelo de transformador para un motor de inducción**

Considerando:

- $\Phi$  = Flujo magnético giratorio por polo
- $E_1$  = Tensión interno del estator
- $E_2$  = Tensión del rotor
- $X_2$  = Reactancia de dispersión del rotor
- $R_2$  = Resistencia del rotor
- $f$  = Frecuencia de red
- $s$  = Deslizamiento
- $I_2$  = Intensidad del rotor
- $\varphi$  = Ángulo de desfase entre  $I_2$  y  $sE_1$
- $T_m$  = Momento de torsión del motor
- $sE_1$  = Tensión engendrada en el rotor para cualquier deslizamiento con  $\Phi = \text{cte}$
- $sf$  = Frecuencia en el rotor para cualquier deslizamiento
- $sX_2$  = Reactancia de dispersión para cualquier deslizamiento

### Circuito del estator

El voltaje de la fuente aplicado al bobinado del estator, difiere del voltaje inducido en la caída de voltaje en la impedancia de fuga del estator. Esto es

$$V_1 = E_1 + I_1(R_1 + jX_1)$$

Donde  $V_1$  es el voltaje de la fuente,  $E_1$  es la tensión inducida o fuerza contraelectromotriz ( $f_{cem}$ ),  $I_1$  es la corriente del circuito de estator y  $R_1$  y  $X_1$  son la resistencia y reactancia de fuga del estator, respectivamente.

La diferencia entre el circuito equivalente de un transformador con respecto al de un motor de inducción se encuentra en la magnitud de los parámetros. Por ejemplo, la corriente de excitación  $I_o$  es considerablemente mas grande en el caso del motor de inducción, debido a la presencia del entrehierro, esta puede llegar a ser tan grande como el 30 al 50% de la corriente de estator  $I_1$  dependiendo del tamaño del motor; en el caso de transformadores la corriente de excitación es solo de entre un 1 a un 5%. Asimismo, la reactancia de fuga o dispersión es mayor en el caso del motor de inducción, debido al entrehierro y al hecho que los bobinados se encuentren distribuidos a lo largo de la periferia del estator (y rotor) mientras en los transformadores están concentrados en un núcleo.

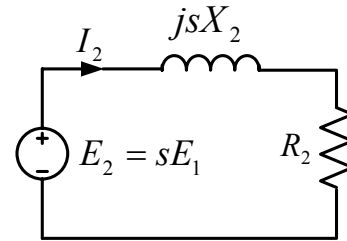


### Circuito del rotor

Los detalles de circuito secundario (rotor) se muestran en la siguiente figura.

Tenemos que la intensidad en el rotor vendrá dada por:

$$I_2 = \frac{sE_1}{R_2 + jsX_2}$$



Modelo del circuito del rotor

El factor de potencia  $\varphi$  será  $\cos \varphi = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{R_2}{R_2 + jsX_2}$

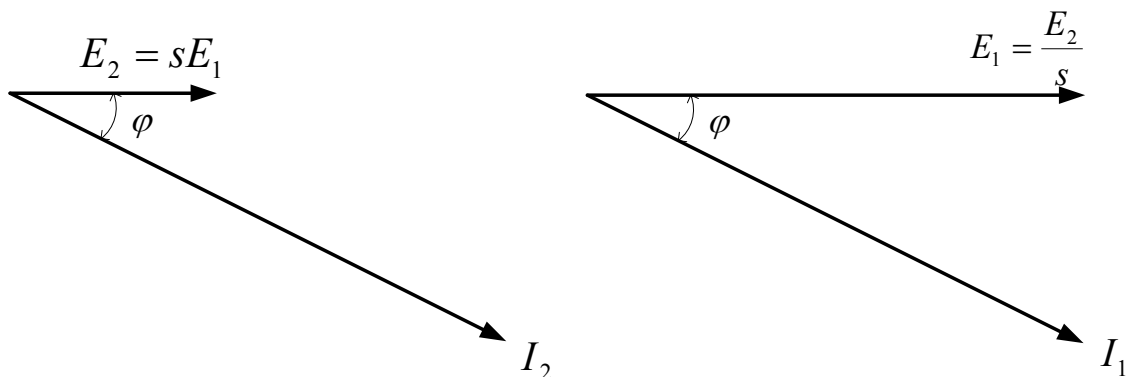
Los diagramas vectoriales se muestran en la siguiente figura

Donde:

- El valor efectivo de  $I_1$  es igual al valor efectivo de  $I_2$ , aun cuando sus frecuencias son diferentes.
- El valor efectivo de  $E_1$  es igual al valor efectivo de  $E_2$  dividido entre el deslizamiento ( $E_1 = E_2 / s$ ).
- El ángulo de la fase entre  $E_1$  e  $I_1$  es igual que entre  $E_2$  e  $I_2$ .

Podemos escribir entonces:  $I_1 = I_2 = \frac{sE_1}{R_2 + jsX_2}$

Por lo tanto,  $I_1 = \frac{E_1}{\frac{R_2}{s} + jX_2} = \frac{E_1}{Z_2}$

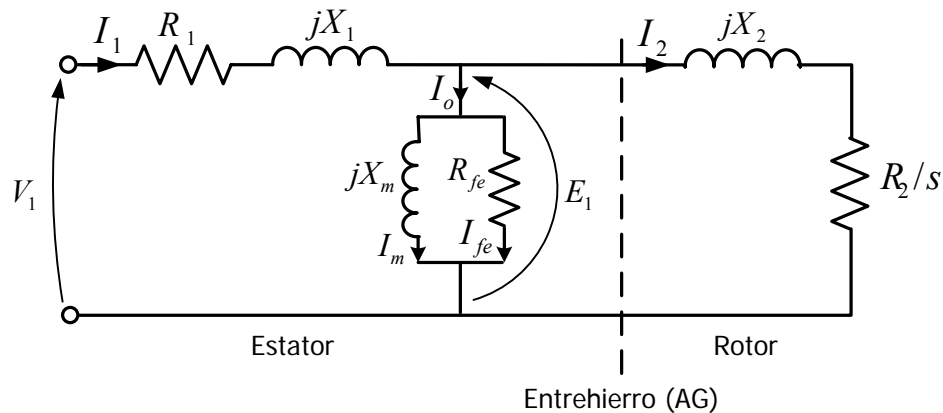


Diagramas vectoriales

Por consiguiente, la impedancia  $Z_2$  vista desde los terminales del estator es,

$$Z_2 = \frac{E_1}{I_1} = \frac{R_2}{s} + jX_2$$

El circuito equivalente final del motor de inducción se muestra en la siguiente figura, los elementos del circuito son fijos, excepto la resistencia  $R_2/s$ . Su valor depende del deslizamiento y por consiguiente de la velocidad del motor. El valor de  $R_2/s$  variara de  $R_2$  a infinito conforme el motor pase del arranque ( $s=1$ ) a la velocidad sincrónica ( $s=0$ ).



**Circuito equivalente por fase de un motor de inducción**

- Con la carga nominal el deslizamiento  $s$  es bajo, el circuito el factor de potencia a la entrada es alta 0,8 aproximadamente.
- En vacío el deslizamiento ( $s \approx 0$ ) es aproximadamente cero, la rama del rotor queda en circuito abierto; el circuito es principalmente inductivo, por lo tanto el factor de potencia es 0,1 - 0,2 aproximadamente.
- En un motor de inducción la corriente de vacío no es despreciable.

### Relaciones de potencia

El circuito equivalente nos permite llegar a algunas relaciones básicas de potencia electromecánica para el motor de inducción trifásico. Podemos deducir las siguientes ecuaciones:

- Potencia absorbida de la red  $P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi$
- Perdida en los conductores del estator (Cu)  $P_{Cu_1} = 3I_1^2 R_1$
- Perdida en los conductores del rotor (Cu)  $P_{Cu_2} = 3I_2^2 R_2 = sP_{AG}$
- Perdidas en el hierro, suelen considerarse concentradas en el estator  
 $P_{fe} = 3E_1^2 / R_{fe}$

- La potencia que atraviesa el entrehierro de la maquina o la potencia que se disipa en la resistencia  $R_2/s$ , es

$$P_{AG} = P_1 - P_{Cu_1} - P_{fe} \qquad P_{AG} = 3 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s}$$

- La potencia mecánica desarrollada por el motor es

$$\left( \begin{array}{c} \text{Salida de potencia} \\ \text{mecánica del rotor} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Potencia} \\ \text{electromagnética} \\ \text{transmitida al rotor} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Perdidas} \\ \text{eléctricas} \\ \text{en el rotor} \end{array} \right)$$

$$P_m = P_{AG} - P_{Cu_2} = (1 - s)P_{AG}$$

Según la siguiente expresión tenemos

$$P_m = \frac{\text{Velocidad del rotor} \times \text{momento de torsión mecánico}}{9.55}$$

Por consiguiente,  $P_m = \frac{nT_m}{9.55}$

- Par o momento de torsión desarrollado por el motor a cualquier velocidad esta dado por

$$T_m = \frac{9.55P_m}{n} = \frac{9.55(1-s)P_{AG}}{n_s(1-s)} = \frac{9.55P_{AG}}{n_s}$$

Por consiguiente,  $T_m = \frac{9.55P_{AG}}{n_s}$

Donde:

- $T_m$  = Par o momento de torsión desarrollado por el motor a cualquier velocidad [N·m]
- $P_{AG}$  = Potencia que atraviesa el entrehierro o potencia disipada en el rotor [W]
- $n_s$  = Velocidad síncrona [r/min]
- 9.55 = Multiplicador para hacer el ajuste de unidades [valor exacto:  $60/2\pi$ ]

El par o momento de torsión real  $T_L$  disponible en el eje es un poco menor que  $T_m$ , debido al par requerido para superar las pérdidas por fricción del aire y por fricción en los cojinetes. Sin embargo, en la mayoría de los cálculos podemos omitir esta pequeña diferencia.

### Eficiencia

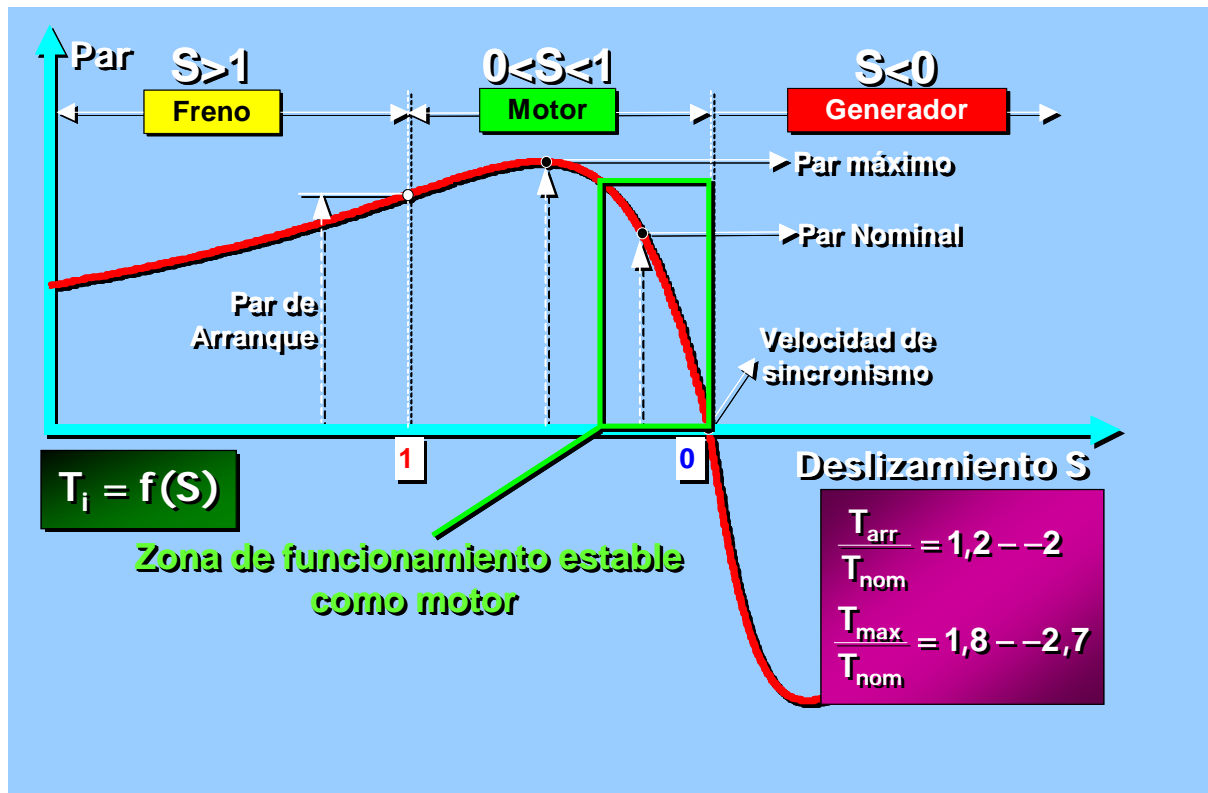
Por definición, la eficiencia de un motor es la relación de la potencia de salida a la potencia de entrada:

$$\eta = \frac{P_L}{P_1} = \frac{P_{AG} - P_V}{P_1}$$

Donde:

- $P_L$  = Potencia transmitida al eje.
- $P_V$  = Pérdida por fricción de rodamientos y del aire.
- $P_1$  = Potencia activa suministrada al estator.
- $P_{AG}$  = Potencia que atraviesa el entrehierro de la máquina.

## Curvas de respuesta mecánica par – velocidad



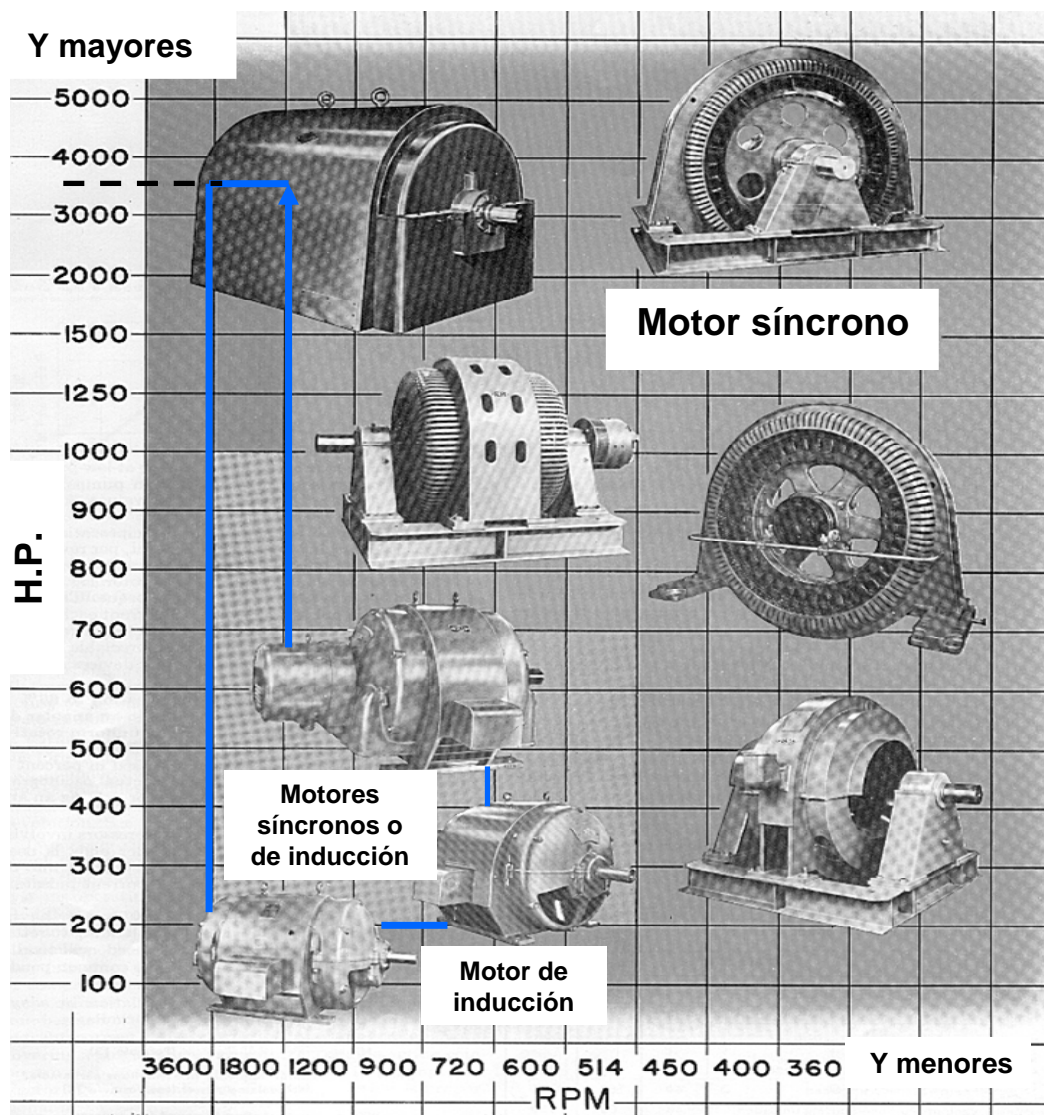
- La característica mecánica de los motores de inducción es prácticamente lineal plena carga.
- El par máximo suele ser de 2 a 3 veces el nominal.
- El par máximo NO depende de la resistencia rotórica  $R_2$ .
- EL deslizamiento al que se produce el par máximo si depende de la resistencia rotórica  $R_2$ . Propiedad se usa para el arranque mediante inserción de resistencias en máquinas de rotor bobinado
- El par de arranque tiene que ser superior al nominal para permitir que el motor se ponga en marcha.
- Para un determinado deslizamiento el par varía con el cuadrado de la tensión.

### Ventajas de los motores de inducción

- La única alimentación eléctrica que reciben se hace a través de la línea trifásica que alimenta al devanado del estator. NO HAY ESCOBILLAS O ELEMENTOS ROZANTES.
- El rotor de jaula es muy robusto ya que no incluye sistema aislante.
- Tienen par de arranque.

- No tienen problemas de estabilidad ante variaciones bruscas de la carga.
- Mínimos o nulos requerimientos de mantenimiento y menores costos de operación.
- La regulación de velocidad y el rendimiento han sido resueltas o mejoradas con diseños ingeniosos o incorporando controladores electrónicos de potencia (variadores de velocidad).

### Aplicación de los motores eléctricos



#### 4. Conclusión

Los transformadores hoy en día cumplen un papel muy importante en la vida moderna, en un sistema eléctrico, la energía es generada en rangos de tensiones de 12 a 25 [kV], luego se eleva a 66 o 110kV para poder transmitirla a grandes distancias con bajas pérdidas en las líneas, posteriormente los transformadores bajan el voltaje hasta un rango de 12 a 25 [kV] para la distribución local y finalmente permiten el uso de la energía a voltajes industriales y domiciliarios. Por lo tanto, el propósito de los transformadores es cambiar de un nivel de tensión a otro según se requiera. Este elemento es el mas eficiente de las maquinas eléctricas, permitiéndonos a seguir utilizando en nuestra vida diaria, por las bondades que nos proporciona.

En cambio el uso de los motores eléctricos esta cambiando, La tabla siguiente permite visualizar muy rápidamente el conjunto de motores eléctricos disponibles, sus principales características y campos de aplicación.

*Hay que destacar la situación obtenida por los motores de inducción trifásicos de jaula en los que el calificativo de «estándar» queda actualmente reforzado por una perfecta adaptación a la utilización conseguida en el desarrollo de dispositivos electrónicos que permiten la variación de velocidad.*

Tipo de motor	Asíncrono de jaula		Asíncrono con anillos	Síncrono con rotor bobinado	rotor tierras raras	Paso a paso	De corriente continua
	trifásico	monofásico					
Coste del motor	Bajo	Fácil	Elevado	Elevado	Elevado	Bajo	Elevado
Motor estanco	Estándar	Posible	Bajo demanda; caro	Bajo demanda; caro	Estándar	Estándar	Posible, muy caro
Arranque directo en la red	Cómodo	Fácil	Dispositivo de arranque especial	Imposible a partir de algunos kW	No previsto	No previsto	No previsto
Variador de velocidad	Fácil	Muy raro	Posible	Frecuente	Siempre	Siempre	Siempre
Coste de la solución con variador de velocidad	Cada vez más económico	Muy económico	Económico	Muy económico	Bastante económico	Muy económico	Muy económico
Prestaciones con variador de velocidad	Cada vez mayores	Muy bajas	Medias	Elevada	Muy elevadas	Media a elevada	Elevada a muy elevadas
Empleo	Velocidad constante o variable	Normalmente, velocidad constante	Velocidad constante o variable	Velocidad constante o variable	Velocidad variable	Velocidad variable	Velocidad variable
Utilización industrial	Universal	Para pequeñas potencias	En disminución	En las grandes potencias en MT	Máquinas herramientas, gran dinámica	Posicionamiento en bucle abierto, para pequeñas potencias	En disminución

## 5. Bibliografía.-

- Maquinas Eléctricas  
Chapman Stephen J.  
Mc Graw Hill Tercera Edición 2003
- Maquinas Eléctricas y Sistemas De Potencia  
Wildi Theodore  
Pearson Prentice Hall Sexta Edición 2007
- Apuntes Sistemas Electromecánicos: Universidad Técnica Federico Santa  
Maria Valparaíso-Chile  
<http://www.elo.utfsm.cl/~elo281/page6.html>
- Apuntes Maquinas Eléctricas  
<http://endrino.cnice.mecd.es/~jhem0027/>
- Apuntes Cursos Virtuales Maquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia  
<http://www.tecsup.edu.pe>
- Apuntes Electrotecnia Universidad de Cuyo Argentina  
<http://fing.uncu.edu.ar/catedras/archivos/electrotecnia/apuntes/>
- Artículos Electrotecnia  
<http://www.paginadigital.com.ar/articulos/sica.html>
- Apuntes ingeniería eléctrica y electrónica  
[www.elprisma.com/apuntes](http://www.elprisma.com/apuntes)
- Electromagnetismo Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires  
[www.fi.uba.ar](http://www.fi.uba.ar)
- Física Fundamentos de Ingeniería  
<http://jidiiaz.iies.es/itraiz.htm>
- Maquinas Eléctricas Universidad de Oviedo  
<http://www.dimie.uniovi.es/maquinas.html>
- Maquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia Universidad Arizona  
[http://www.eas.asu.edu/~karady/360\\_pp.html](http://www.eas.asu.edu/~karady/360_pp.html)



### LISTA PARA REVISAR POR SU PROPIA CUENTA EL VALOR DEL DOCUMENTO

- Yo tengo una página de cobertura similar al ejemplo de la página 89 o 90 del Suplemento.
- Yo incluí una tabla de contenidos con la página correspondiente para cada componente.
- N/A Yo incluí un abstracto del documento (exclusivamente para la Tesis).
- Yo seguí el contorno propuesto en la página 91 o 97 del Suplemento con todos los títulos o casi.
- Yo usé referencias a través de todo el documento según el requisito de la página 92 del Suplemento.
- Mis referencias están en orden alfabético al final según el requisito de la página 92 del Suplemento.
- Cada referencia que mencioné en el texto se encuentra en mi lista o viceversa.
- Yo utilicé una ilustración clara y con detalles para defender mi punto de vista.
- Yo utilicé al final apéndices con gráficas y otros tipos de documentos de soporte.
- Yo utilicé varias tablas y estadísticas para aclarar mis ideas más científicamente.
- Yo tengo por lo menos 50 páginas de texto (15 en ciertos casos) salvo si me pidieron lo contrario.
- Cada sección de mi documento sigue una cierta lógica (1,2,3...)
- Yo no utilicé caracteres extravagantes, dibujos o decoraciones.
- Yo utilicé un lenguaje sencillo, claro y accesible para todos.
- Yo utilicé Microsoft Word (u otro programa similar) para chequear y eliminar errores de ortografía.
- Yo utilicé Microsoft Word / u otro programa similar) para chequear y eliminar errores de gramática.
- Yo no violé ninguna ley de propiedad literaria al copiar materiales que pertenecen a otra gente.
- Yo afirmo por este medio que lo que estoy sometiendo es totalmente mi obra propia.



Firma del Estudiante

Enero 2007

Fecha



## **PROPUESTA DE PENSUM**

**Nombre: Godofredo Barrantes Zapana**

**ID: UB3202SEE7842**

**LICENCIADO EN INGENIERIA ELECTRICA**

**SEGUNDA FASE**

**ATLANTIC INTERNATIONAL UNIVERSITY**  
**Honolulu, Hawaii**

**JUNIO 2006**

## PROPUESTA DE PENSUM

**DIPLOMA:** Licenciado

**CAMPO:** Ingeniería Eléctrica

**NOMBRE:** Godofredo Barrantes Zapana

**FECHA:** Junio 2006

TITULO DE LA ASIGNATURA	CONTENIDO	OBJETIVOS	ACTIVIDADES	FUENTE DE DATOS BIBLIOGRAFIA
<p><b>1.</b> <b>ELECTROMAGNETISM</b></p>	<p>1. Magnetismo e imanes 2. Magnitudes fundamentales del magnetismo 3. Flujo magnético y densidad de flujo magnético 4. Circuitos magnéticos 5. Fuerza magnetomotriz 6. Intensidad de campo magnético 7. Saturación magnética 8. Teorema de Ampère 9. Reluctancia magnética 10. Fuerza electromotriz inducida 11. Fuerza electromotriz inducida en una espira 12. Fuerza electromotriz inducida en un conductor en movimiento 13. Fuerza electrodinámicas 14. Histéresis magnética 15. Corrientes parásitas de Foucault</p>	<p>1. Familiarizarse con la terminología utilizada en el electromagnetismo 2. Identificar cada uno de los parámetros principales del electromagnetismo y sus respectivas unidades. 3. Revisar los conceptos y leyes fundamentales utilizadas como herramientas básicas en la solución de problemas del electromagnetismo</p>	<p>1. Búsqueda de documentación existente sobre la temática.  2. Investigación sobre la temática.  3. Investigaciones en Internet.  4. Escribir un documento resumen sobre la temática.</p>	<p>Documentación de la librería Universitaria AIU. Librería publica. Investigación en Internet Propia experiencia.</p> <hr/> <p>Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería Cheng, David K.</p> <p>Electromagnetismo Kraus, John D.</p> <p>Elementos de electromagnetismo Sadiku, Matthew N. O.</p>

## PROPUESTA DE PENSUM

**DIPLOMA:** Licenciado

**CAMPO:** Ingeniería Eléctrica

**NOMBRE:** Godofredo Barrantes Zapana

**FECHA:** Junio 2006

TITULO DE LA ASIGNATURA	TEMAS	OBJETIVOS	ACTIVIDADES	FUENTE DE DATOS BIBLIOGRAFIA
<b>2. ELECTRICAL CIRCUITS</b>	1. Definiciones y parámetros de circuitos 2. Valor medio y eficaz 3. Intensidad de corriente y tensión senoidales 4. Números complejos 5. Impedancia compleja y notación fasorial 6. Circuitos serie y paralelo 7. Potencia eléctrica y factor de potencia 8. Resonancia serie y paralelo 9. Teorema general de circuitos 10. Sistemas polifásicos.	1. Familiarizarse con la terminología utilizada en circuitos eléctricos. 2. Identificar cada uno de los parámetros principales de los sistemas eléctricos y sus respectivas unidades. 3. Revisar los conceptos y leyes fundamentales utilizadas como herramientas básicas en la solución de problemas de circuitos eléctricos.	1. Búsqueda de documentación existente sobre la temática.  2. Investigación sobre la temática.  3. Investigaciones en Internet.  4. Escribir un documento resumen sobre la temática.	Documentación de la librería Universitaria AIU. Librería publica. Investigación en Internet Propia experiencia.  <hr/> Circuitos Eléctricos. Edminister, Joseph A.  Análisis de Circuitos Eléctricos. Johnson, David E.  Fundamentos de circuitos eléctricos Cogdel, J.R.

## PROPUESTA DE PENSUM

**DIPLOMA:** Licenciado

**CAMPO:** Ingeniería Eléctrica

**NOMBRE:** Godofredo Barrantes Zapana

**FECHA:** Junio 2006

TITULO DE LA ASIGNATURA	TEMAS	OBJETIVOS	ACTIVIDADES	FUENTE DE DATOS BIBLIOGRAFIA
<b>3. ELECTRICITY MACHINES</b>	1. Introducción a los principios de las maquinas eléctricas. 2. Transformadores. 3. Fundamentos de maquinas eléctricas. 4. Generadores de C.C. 5. Motores de C.C. 6. Fundamentos de maquinas de C.A. 7. Generadores sincrónicos. 8. Motores sincrónicos. 9. Motores de inducción.	1. Familiarizarse con la terminología utilizada en la conversión de energía. 2. Identificar cada uno de los parámetros principales de los sistemas de conversión de energía y sus respectivas unidades. 3. Revisar los conceptos y leyes fundamentales utilizadas como herramientas básicas en la solución de problemas de las maquinas eléctricas.	1. Búsqueda de documentación existente sobre la temática.  2. Investigación sobre la temática.  3. Investigaciones en Internet.  4. Escribir un documento resumen sobre la temática.	Documentación de la librería Universitaria AIU. Librería publica. Investigación en Internet Propia experiencia.  <hr/> Maquinas Eléctricas Chapman Stephen J.  Maquinas Eléctricas y Sistemas Accionadores Gray, Clifford B.

## PROPUESTA DE PENSUM

**DIPLOMA:** Licenciado

**CAMPO:** Ingeniería Eléctrica

**NOMBRE:** Godofredo Barrantes Zapana

**FECHA:** Junio 2006

<b>TITULO DE LA ASIGNATURA</b>	<b>TEMAS</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>ACTIVIDADES</b>	<b>FUENTE DE DATOS BIBLIOGRAFIA</b>
<b>4. ELECTRICAL POWER SYSTEM</b>	1. Fundamentos generales de sistemas de potencia. 2. Representación de las líneas de producción y distribución de energía. 3. Ecuación de redes y su resolución. 4. Estudio de cargas. 5. Fallos trifásicos simétricos en maquinas sincronías. 6. Componentes simétricos. 7. Fallos asimétricos. 8. Estabilidad de sistema.	1. Reconocer las características generales que gobiernan a un sistema eléctrico de potencia. 2. Identificar los símbolos de cada componente de un sistema de potencia, representación unifilar. 3. Revisar los conceptos y leyes fundamentales utilizadas como herramientas básicas en la solución de problemas de sistemas de potencia.	1. Búsqueda de documentación existente sobre la temática. 2. Investigación sobre la temática. 3. Investigaciones en Internet. 4. Escribir un documento resumen sobre la temática.	Documentación de la librería Universitaria AIU. Librería publica. Investigación en Internet Propia experiencia. <hr/> Sistemas Eléctricos de Potencia Stevenson William D. Sistemas Eléctricos de Potencia Harper Enriquez Análisis de Sistemas de Potencia Grainger John J. / Stevenson William D.

## PROPUESTA DE PENSUM

**DIPLOMA:** Licenciado

**CAMPO:** Ingeniería Eléctrica

**NOMBRE:** Godofredo Barrantes Zapana

**FECHA:** Junio 2006

<b>TITULO DE LA ASIGNATURA</b>	<b>TEMAS</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>ACTIVIDADES</b>	<b>FUENTE DE DATOS BIBLIOGRAFIA</b>
<b>5. ENGLISH IDIOM</b>	1. La oración. 2. El sustantivo. 3. El adjetivo. 4. El articulo. 5. El adverbio. 6. El pronombre 7. El verbo. 8. La conjunción 9. Interjección 10. Gramática 11. Pronunciación 12. Vocabulario	1. Interpretar y traducir manuales técnicos del idioma ingles.  2. Comunicación en el idioma ingles, con el entorno laboral y social.	1. Búsqueda de documentación existente sobre la temática.  2. Investigación sobre la temática.  3. Revisión de bibliografía y documentos relacionados.  4. Realizar prácticas de comunicación.  5. Escribir un documento resumen sobre la temática.	Documentación de la librería Universitaria AIU. Librería publica. Investigación en Internet <hr/>

## PROPUESTA DE PENSUM

**DIPLOMA:** Licenciado

**CAMPO:** Ingeniería Eléctrica

**NOMBRE:** Godofredo Barrantes Zapana

**FECHA:** Junio 2006

<b>TITULO DE LA ASIGNATURA</b>	<b>TEMAS</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>ACTIVIDADES</b>	<b>FUENTE DE DATOS BIBLIOGRAFIA</b>
<b>6. ELECTRICAL SYSTEM PROTECTION</b>	1. conceptos básicos de protección en sistemas eléctricos. 2. Introducción al estudio de corto circuito. 3. El concepto de protección y equipos auxiliares. 4. Generalidades sobre relés de protección. 5. Protección de transformadores de potencia. 6. Protección de líneas de transmisión. 7. Protección de redes de distribución.	1. Establecer los criterios generales de la protección y aplicar en la generación, transporte, transformación y distribución de energía eléctrica. 2. Identificar la simbología utilizada en la protección de sistemas eléctricos. 3. Reconocer los dispositivos utilizados en la protección de sistemas eléctricos. 4. Establecer los criterios de ajustes de los relés de protección y su coordinación.	1. Búsqueda de documentación existente sobre la temática.  2. Investigación sobre la temática.  3. Investigaciones en Internet.  4. Escribir un documento resumen sobre la temática.	Documentación de la librería Universitaria AIU. Librería pública. Investigación en Internet  Propia experiencia y relacionar con el trabajo diario.  <hr/> Protección de Sistemas Eléctricos. Harper Enríquez



## PROPUESTA DE PENSUM

**DIPLOMA:** Licenciado

**CAMPO:** Ingeniería Eléctrica

**NOMBRE:** Godofredo Barrantes Zapana

**FECHA:** Junio 2006

<b>TITULO DE LA ASIGNATURA</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>ACTIVIDADES</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>
<b>7. ELECTRICAL MEASUREMENT AND INSTRUMENTATION</b>	1. Conceptos fundamentales. 2. Generalidades sobre instrumentos de medición 4. Transformadores de medida. 5. Medición de corriente, tensión, frecuencia, factor de potencia, potencia y energía. 6. Instrumentos de medición.	1. Revisar y comprender los conceptos y leyes fundamentales utilizadas en las mediciones eléctricas. 2. Identificar la simbología utilizada en la instrumentación de sistemas eléctricos. 3. Identificar y seleccionar los instrumentos de medición y definir sus parámetros. 5. Revisar las aplicaciones en la industria.	1. Búsqueda de documentación existente sobre la temática. 2. Investigación sobre la temática. 3. Investigaciones en Internet. 4. Escribir un documento resumen sobre la temática.	Documentación de la librería Universitaria AIU. Librería publica. Investigación en Internet Propia experiencia. <hr/> Metrología Gonzales Gonzales, Carlos Zeleny Vasquez, Ramon

## PROPUESTA DE PENSUM

**DIPLOMA:** Licenciado

**CAMPO:** Ingeniería Eléctrica

**NOMBRE:** Godofredo Barrantes Zapana

**FECHA:** Junio 2006

TITULO DE LA ASIGNATURA	TEMAS	OBJETIVOS	ACTIVIDADES	FUENTE DE DATOS BIBLIOGRAFIA
<b>8. POWER ELECTRONICS</b>	1. Introducción a la electrónica de potencia. 2. Semiconductores de potencia. 3. Rectificadores de media onda. 4. Conversión CA-CC. 5. Conversion CA-CA. 6. Conversión CC-CC. 7. Fuentes de poder. 8. Inversión CC-CA 9. Variadores de velocidad. 10. Cicloconvertidores.	1. Reconocer los dispositivos semiconductores de potencia 2. Comprender los principios de funcionamiento de los dispositivos de potencia 3. Identificar los principales parámetros usados para seleccionar los dispositivos. 4. Revisar los conceptos y leyes fundamentales utilizadas como herramientas básicas en solución de problemas de la electrónica de potencia. 5. Revisar las aplicaciones en la industria.	1. Búsqueda de documentación existente sobre la temática.  2. Investigación sobre la temática.  3. Investigaciones en Internet.  4. Escribir un documento resumen sobre la temática.	Documentación de la librería Universitaria AIU. Librería publica. Investigación en Internet Propia experiencia.  <hr/> Electrónica de Potencia Rashid Muhammad H.  Electrónica de Potencia Hart Daniel W.

## PROPUESTA DE PENSUM

**DIPLOMA:** Licenciado

**CAMPO:** Ingeniería Eléctrica

**NOMBRE:** Godofredo Barrantes Zapana

**FECHA:** Junio 2006

<b>TITULO DE LA ASIGNATURA</b>	<b>TEMAS</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>ACTIVIDADES</b>	<b>FUENTE DE DATOS BIBLIOGRAFIA</b>
<b>9. CONTROL SYSTEMS</b>	1. Introducción al control automático. 2. Medición de variables de proceso. 3. Elementos finales de control. 4. Controladores programables. 5. Fundamentos de control de lazo cerrado. 6. Introducción al control PID. 7. Símbolos y nomenclaturas para los instrumentos.	1. Comprender los fundamentos del control automático. 3. Familiarizarse con la simbología y terminología utilizada en control automático. 4. Revisar los conceptos y leyes fundamentales utilizadas como herramientas básicas en la solución de problemas del control automático. 5. Revisar las aplicaciones en la industria.	. 1. Búsqueda de documentación existente sobre la temática. 2. Investigación sobre la temática. 3. Investigaciones en Internet. 4. Escribir un documento resumen sobre la temática.	Documentación de la librería Universitaria AIU. Librería pública. Investigación en Internet Propia experiencia. <hr/> Instrumentación Industrial Creus Antonio  Instrumentación y control industrial. Bolton, W.

## PROPUESTA DE PENSUM

**DIPLOMA:** Licenciado

**CAMPO:** Ingeniería Eléctrica

**NOMBRE:** Godofredo Barrantes Zapana

**FECHA:** Junio 2006

<b>TITULO DE LA ASIGNATURA</b>	<b>TEMAS</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>ACTIVIDADES</b>	<b>FUENTE DE DATOS BIBLIOGRAFIA</b>
<b>10. HIGH VOLTAGE TECHNIC</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aparamenta de alta tensión,</li> <li>2. Aparatos de maniobra y corte.</li> <li>3. Calculo de corrientes de corto circuito.</li> <li>4. Aparamenta para protección y medida.</li> <li>5. Ejemplos de aplicación de aparamenta de alta tensión.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comprender los fundamentos y técnicas de alta tensión.</li> <li>3. Familiarizarse con la simbología y terminología utilizada en alta tensión.</li> <li>4. Revisar los conceptos y leyes fundamentales utilizadas como herramientas básicas en la solución de problemas de alta tensión.</li> <li>5. Revisar las aplicaciones en la industria.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Búsqueda de documentación existente sobre la temática.</li> <li>2. Investigación sobre la temática.</li> <li>3. Investigaciones en Internet.</li> <li>4. Escribir un documento resumen sobre la temática.</li> </ol>	<p>Documentación de la librería Universitaria AIU.            Librería publica.            Investigación en Internet            Propia experiencia.</p> <hr/> <p>Instalaciones eléctricas de alta tensión, sistemas de maniobra, medida y protección.</p> <p>Navarro Marquez, Jose A. Montañes Espinosa, Antonio.</p>

## PROPUESTA DE PENSUM

**DIPLOMA:** Licenciado

**CAMPO:** Ingeniería Eléctrica

**NOMBRE:** Godofredo Barrantes Zapana

**FECHA:** Junio 2006

<b>TITULO DE LA ASIGNATURA</b>	<b>TEMAS</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>ACTIVIDADES</b>	<b>FUENTE DE DATOS BIBLIOGRAFIA</b>
<b>11. DIGITAL SYSTEMS</b>	1. Introducción a los conceptos digitales. 2. Sistemas de numeración. 3. Puertas lógicas. 4. Algebra de Boole. 5. Lógica combinacional. 6. Dispositivos lógicos programables 7. Flip-flops y dispositivos relacionados. 8. Contadores. 9. Registros de desplazamiento. 10. Memorias. 11 Microprocesadores y micro-ordenadores. 12 Tecnologías de los circuitos integrados	1. Comprender los fundamentos de los sistemas digitales. 3. Familiarizarse con la simbología y terminología utilizada en sistemas digitales. 4. Revisar los conceptos y leyes fundamentales utilizadas como herramientas básicas en la solución de problemas de sistemas digitales. 5. Revisar las aplicaciones en la industria.	1. Búsqueda de documentación existente sobre la temática.  2. Investigación sobre la temática.  3. Investigaciones en Internet.  4. Escribir un documento resumen sobre la temática.	Documentación de la librería Universitaria AIU. Librería publica. Investigación en Internet Propia experiencia.  <hr/> Fundamentos de sistemas digitales. Floyd, Thomas I.  Sistemas digitales. Velasco, Josep a.  Sistemas digitales. Tocci, Ronald J.

## PROPUESTA DE PENSUM

**DIPLOMA:** Licenciado

**CAMPO:** Ingeniería Eléctrica

**NOMBRE:** Godofredo Barrantes Zapana

**FECHA:** Junio 2006

<b>TITULO DE LA ASIGNATURA</b>	<b>TEMAS</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>ACTIVIDADES</b>	<b>FUENTE DE DATOS BIBLIOGRAFIA</b>
<b>12. ELECTRICAL SAFETY</b>	1. Introducción 2. Prevención de riesgos eléctricos. 3. Protección contra corrientes de choque. 6. Puesta a tierra de las instalaciones eléctricas. 6. Protección contra incendios en instalaciones eléctricas. 7. Trabajos en tensión, en baja tensión. 8. Primeros auxilios.	1. Comprender la importancia de la seguridad eléctrica. 2. Identificar los riesgos eléctricos y minimizar estos. 3. Revisar las aplicaciones en la industria.	1. Búsqueda de documentación existente sobre la temática. 2. Investigación sobre la temática. 3. Investigaciones en Internet. 4. Escribir un documento resumen sobre la temática.	Documentación de la librería Universitaria AIU. Librería publica. Investigación en Internet Propia experiencia. <hr/> Seguridad en las instalaciones eléctricas. Roldan Viloría, Jose

**NOTA:** El desarrollo de cada asignatura del pensum, será de 20 páginas como mínimo.