

## 1.- INTRODUCCIÓN

Las generadores síncronos, son los encargados de transformar la energía mecánica en energía eléctrica. Estas máquinas están constituidas de circuitos magnéticos (núcleos del estator y rotor) y circuitos eléctricos (devanado trifásico estatórico y devanado de campo)

Recibe el nombre de máquina síncrona a todo conversor de energía mecánica – eléctrica. Están constituidas de dos devanados:

- El primero se conecta a la red eléctrica a frecuencia fija  $W_s$  (corriente alterna).
- El segundo es conectado al circuito de excitación (corriente continua).

Esta máquina presenta la siguiente particularidad:

$$\text{Frecuencia mecánica} = \text{Frecuencia eléctrica}$$

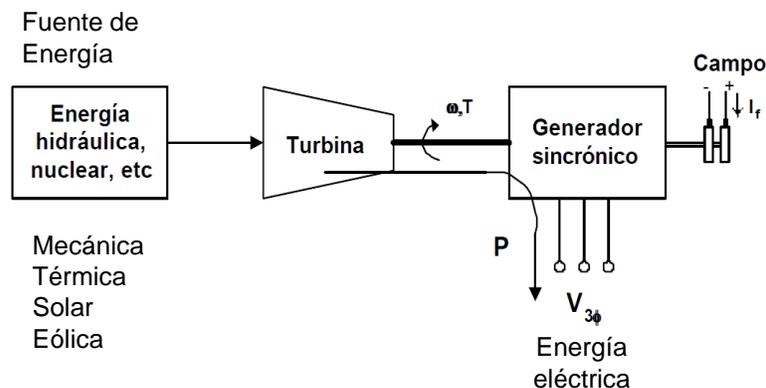


Figura N° 1.1 Configuración de un sistema de generación

## 2.- CLASIFICACION.-

Según el tipo de excitación se pueden clasificar en dos grandes grupos:

**Pequeña potencia (< 20 KW).**- Tienen el devanado de excitación en el estator (**polos salientes**) el mismo que trabaja con DC. El devanado trifásico se ubica en el rotor (**polos lizos**) trabaja con AC. La energía alterna es conectada hacia la carga mediante un juego de anillos rozantes y un juego de escobillas (este modelo presenta múltiples problemas y desventajas).

**Gran potencia (> 20 KW).**- Tiene el devanado de excitación en el rotor (polos salientes), el cual trabajan con DC. El devanado trifásico se ubica en el estator (polos

lizados) el cual trabaja con AC. La energía alterna es conectada en forma directa a la carga, esto constituye una gran ventaja frente al primer tipo.

**Según la velocidad de los rotores se pueden clasificar en:**

**Rápidos.-** En turbinas de gas ó vapor que desarrollan velocidades de 2 y 4 polos (velocidades de 1800 y 3600 RPM).

**Lentos.-** Turbinas hidráulicas 60 a 720 RPM. Y motores diesel y combustión interna  $720 < \text{RPM} > 200$ .

**Según el tipo de rotor se pueden clasificar en:**

**Rotor cilíndrico.-** Se usa en máquinas de alta velocidad (2 a 4 polos). Para lo cual se utilizan turbinas de gas o vapor. (Centrales térmicas).

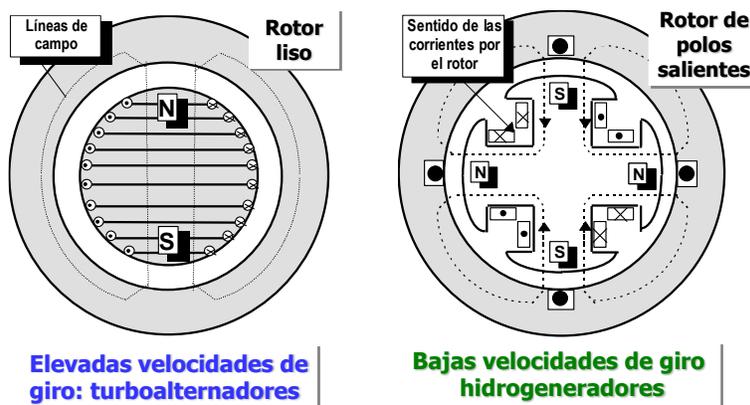


Figura N° 1.2 Tipo de rotores utilizados en máquinas síncronas.

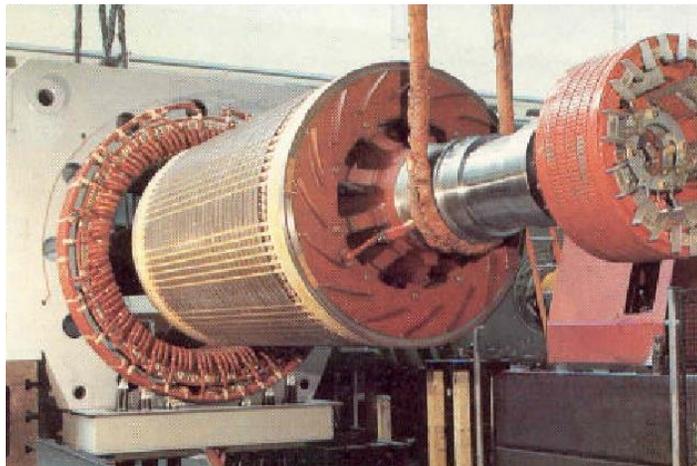


Figura N° 1.3 Máquinas síncronas de polos cilíndricos (lisos).

**Rotor de polos salientes.-** Se usa en máquinas de baja velocidad (gran número de polos). Para lo cual se utilizan turbinas hidráulicas (centrales hidroeléctricas)

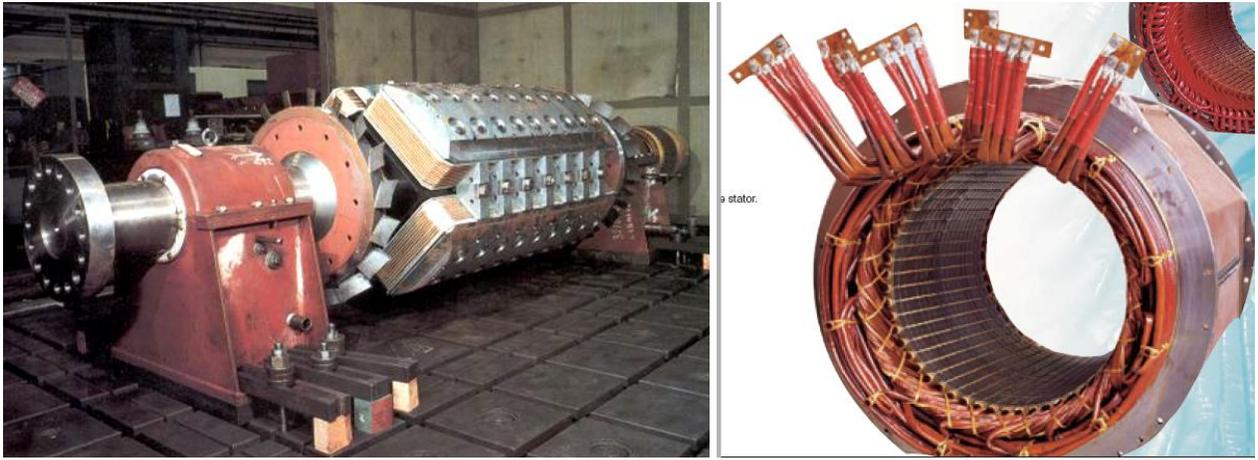


Figura N° 1.4 Rotor de polos salientes y estator trifásico convencional

### 3.- CONSTITUCIÓN ELECTROMECÁNICA

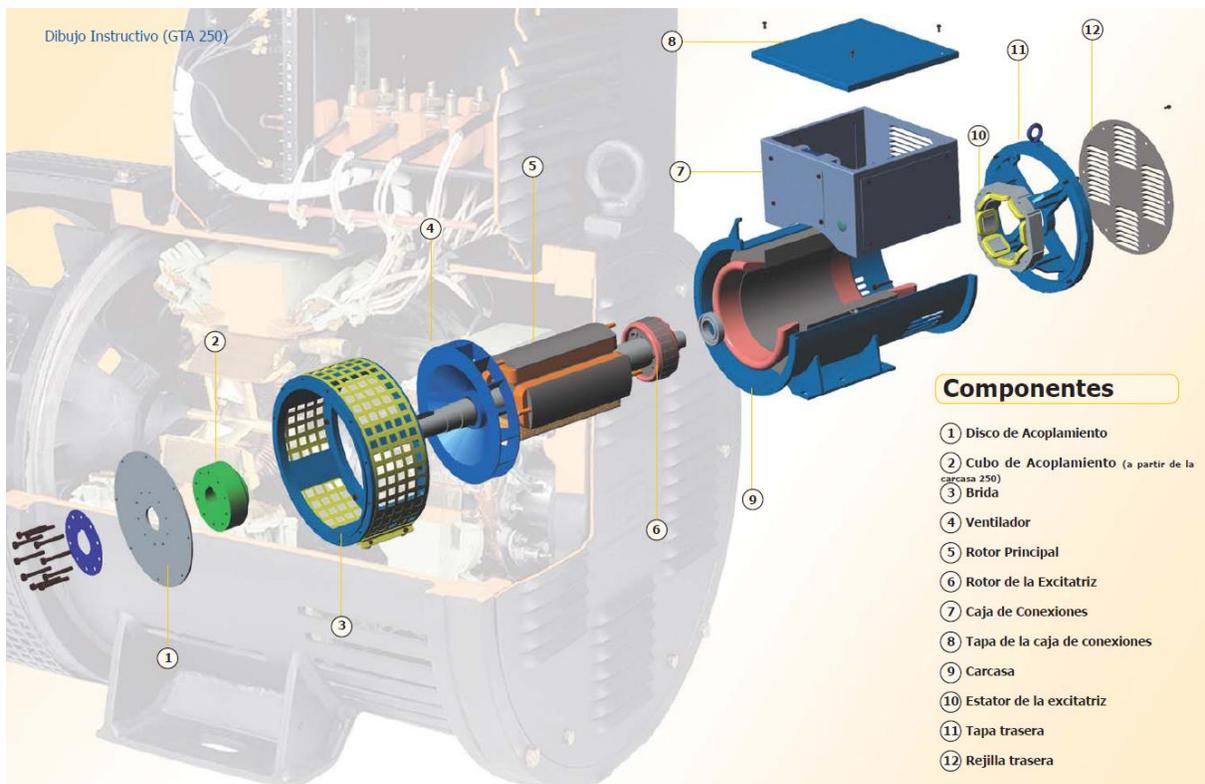


Figura N° 1.5 Constitución electromecánica de los generadores síncronos

### 3.1.- ESTATOR PRINCIPAL

El paquete estático, que por lo general es de polos lisos, es instalado en las nervaduras de su carcasa de acero calandrado. En las ranuras del paquete magnético estático se hallan convenientemente distribuido los arrollamientos trifásicos los que serán llevados a la caja de conexiones a través de conductores aislados flexibles clase H. Así mismo todos los materiales aislantes, alambres esmaltados y/o platinas forradas son como mínimo de clase de aislamiento F.

Después del proceso de barnizado, las cabezas de bobinas son fortalecidas con resinas con clase de aislamiento F para que posean una mejor resistencia mecánica y puedan resistir las fuertes corrientes y las vibraciones.

Los alternadores trifásicos modernos no tienen escobillas, y son alimentados a través de una excitatriz: estator (polos salientes) y rotor (polos lisos).

La tensión de salida es mantenida mediante el AVR que constantemente supervisa la tensión del alternador y alimenta al campo de la excitatriz principal con la corriente necesaria para generar la tensión nominal.

#### **Ventajas del sistema:**

- . Menor costo de mantenimiento.
- No hay interferencias por contacto.
- Menor interferencia debido al AVR transistorizada y tiristorizada.
- AVR es de menor corriente.

#### **Desventajas del sistema:**

- . El generador síncrono es más caro (costo de adquisición).
  - . El tiempo de respuesta es mayor debido a la excitatriz y AVR.
- Es necesario utilizar un PMG.

### 3.2.- ROTOR PRINCIPAL

Es la parte móvil de la máquina donde se ubican los arrollamientos del bobinado de campo (inductor), es de polos salientes y lisos (según sea el tipo de generador); por lo tanto esta conformado por zapatas cuyos paquetes magnéticos están formados por hierro silicoso con alto contenido de silicio (entre 4 a 6 % de silicio). Este bobinado es alimentado con corriente continua que procede de la excitatriz, los mismos que reciben una tensión bifásica ó trifásica del estator a través del AVR. El conjunto de barras de cada polo serán unidas con las barras del polo inmediato formándose en su totalidad una jaula de ardilla. Esta jaula forma el circuito de amortiguamiento cuyo trabajo es compensar las cargas transitorias puestas en paralelo y corrientes de cortocircuito.

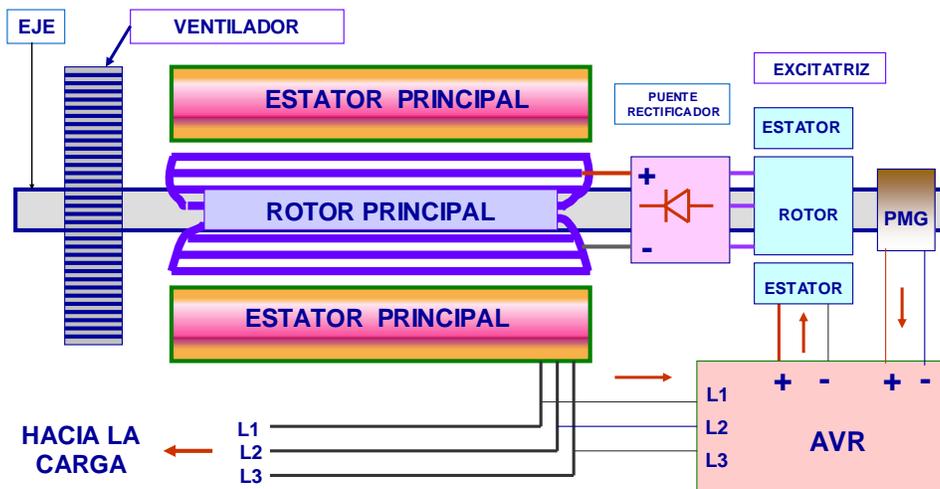


Figura N° 1.6.- Constitución electromecánica de los Generadores síncronos

### 3.3.- CIRCUITO DE AMORTIGUAMIENTO

Está constituido por un conjunto de barras axiales de cobre, latón ó aluminio, cortocircuitadas en sus extremos por anillos del mismo material; conformando de esta manera una jaula de ardilla fraccionada. Este circuito se halla enclavado en las zapatas polares del rotor principal de los alternadores, y la cantidad de barras depende de la potencia de las máquinas y de su polaridad y/o velocidad nominal de operación.

El objetivo de este circuito es compensar las sobre corrientes transitorias que las cargas puedan presentar, proporcionándole muy buena estabilidad al generador. La finalidad de este circuito es reducir las oscilaciones de la máquina síncrona, provocadas por las cargas externas, asincronismos graves en la conexión en paralelo y variaciones bruscas de carga.

Siempre que se tenga un movimiento relativo entre el rotor y el campo magnético inducido (debido a las cargas transitorias) aparecerán tensiones inducidas en los arrollamientos del campo pudiendo dañar los diodos girantes.

En el circuito amortiguador también surgirá una corriente inducida produciendo un torque cuya actuación favorece a mantener a esta máquina en sincronismo reduciendo sensiblemente las oscilaciones y sobretensiones del rotor.

El efecto del circuito amortiguador se hace presente en la disminución de la intensidad de las armónicas cuando la carga de los alternadores son deformantes.

### 3.4.- EXCITATRIZ INDUCTIVA

Encargada de recibir corriente continua del AVR y entregar AC al puente rectificador giratorio; y esta conformado por:

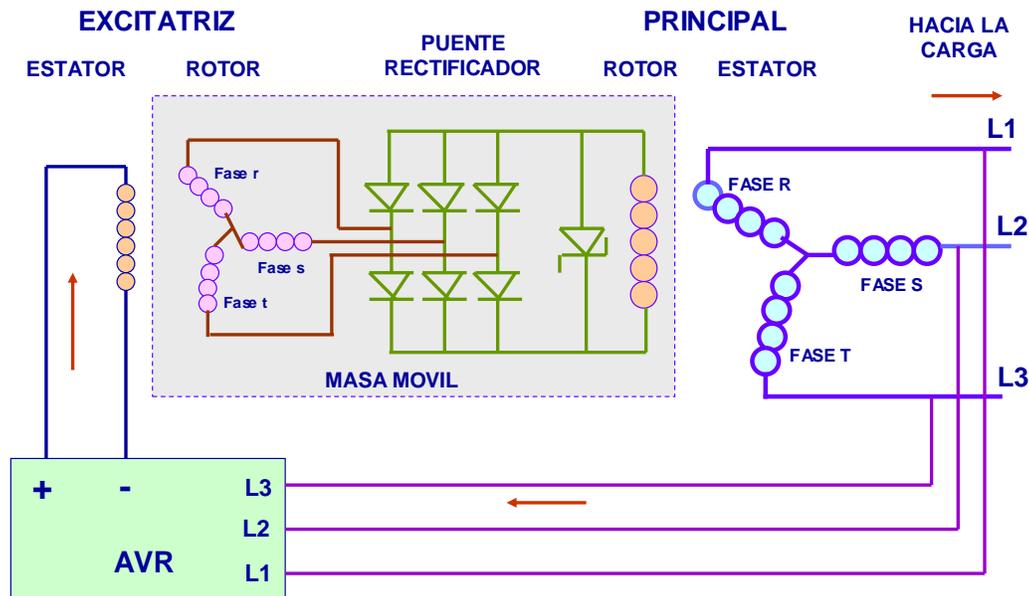


Figura N° 1.7.- Esquema de un generador síncrono moderno inductivo

**Estator de la excitatriz.-** La excitatriz principal es un circuito de polos salientes que está alimentada por tensión continua que entrega el AVR en sus terminales de salida; la función de este inductor es crear las líneas de campo magnético estacionario que deben ser cortados por los conductores del rotor de la excitatriz para generar corriente trifásica. Es de polos salientes y está instalada fijamente junto a la carcasa del estator principal de la máquina. En sus polos salientes se ubican los arrollamientos de los bobinados de excitación (inductor), que son conectadas en serie y sus terminales de este circuito son llevados a la caja de conexiones (tablero de bornes) para luego ser conectados al AVR. Todos los materiales conductores aislados y aislantes tienen una clase de aislamiento F.

**Rotor de la excitatriz.-** El rotor de la excitatriz está instalado sobre el eje del rotor principal. Su paquete magnético es laminado y en sus ranuras se distribuye el bobinado trifásico conectado generalmente en estrella. El punto común de este tipo de conexión (estrella) no es utilizado pues trabaja con la tensión de línea. De los terminales de la conexión estrella salen los cables flexibles para ser conectados al puente rectificador giratorio. De este puente salen dos cables positivo y negativo que alimentan al estator principal del generador síncrono.

**Diodos rectificadores giratorios.-** Están ubicados en el eje del rotor principal entre el rotor de la excitatriz y el rotor principal del generador. Los diodos rectificadores que conforman el puente de onda completa trifásico poseen disipadores de aluminio. Para facilitar el montaje se utiliza un porta diodos (material aislante) que se fija en el eje de la máquina.

### 3.5.- PMG (MAGNETIC PERMANET GENERATOR)

Es un pequeño generador de corriente continua cuyo campo es un imán permanente y el circuito de armadura está compuesto por un bobinado convenientemente conectado a su colector por donde se extrae la corriente continua vía un par de escobillas (generador de imán

permanente). Esta pequeña fuente de energía es conectada al regulador automático de tensión y su finalidad es compensar los arranques de cargas pesadas y/o neutralizar los transitorios de fuertes cargas que se pueden presentar durante el ciclo de trabajo. Es instalada en el eje del rotor principal y en la parte externa del alternador L.O.A. (lado opuesto al acoplamiento).

### **3.6.- REGULADORES AUTOMÁTICOS**

Están conformados por dos etapas muy importantes que tienen la responsabilidad de entregarnos la tensión (AVR) y frecuencia (RAS) constantes en los bornes del generador.

**AVR ( regulador automático de tensión).**- Los AVR trabajan con un margen de tolerancia que están directamente relacionados con las tensiones de referencia y del alternador (tensión de la carga), controlada por un amplificador operacional que trabaja en un régimen de enclavamiento.

La alimentación del regulador es obtenida de los bornes del alternador ó por medio de un transformador de acoplamiento de donde proviene la tensión de valor real proporcional a la tensión de la máquina. Contiene un diodo zener que abastece al regulador de un valor de tensión de referencia. La diferencia de la tensión de referencia y la real es aplicada a un amplificador operacional, cuya alimentación influye en el comportamiento del control (estabilidad y precisión) y el tiempo de respuesta del regulador.

**El AVR esta constituido por:** Dispositivo sensible a los cambios de tensión, circuito regulador inteligente (Amplificador Operacional), puente de tiristores de Graetz redundante, transformador de excitación estrella – delta, interruptor de campo CA ó CC, Tablero moderno IP55 e interfase IHM.

**Las funciones del AVR son:** Cumplir con los criterios de respuesta especificados, cumplir con la flexibilidad en la operación, cumplir con la confiabilidad y fiabilidad del sistema, implementación de niveles de redundancia, tener la opción de trabajar con telemetría, estar totalmente integrado al SEP, tener una respuesta rápida para hacer frente a las contingencias del sistema.

#### **Además provee funciones de control y protección de:**

- Tensión
- Flujo de la potencia reactiva.
- Mejorar la estabilidad del sistema
- Asegurar los límites permisibles de la máquinas síncronas

**RAS ( regulador automático de velocidad).**- Los RAS son los responsables de entregarnos en bornes del generador síncrono, una frecuencia cuyo valor debe estar dentro de lo establecido por las normas vigentes. Está constituido por: Dispositivo sensible a la velocidad, relé de velocidad o válvula piloto, y servomotor hidráulico.

El RAS realiza las siguientes funciones:

- . Regula la velocidad mecánica del motor primo.
- . Regula la potencia activa que produce el generador síncrono.
- . Controla la posición del ángulo de ataque del chorro de agua.
- . Controla los relés de: Potencia, posición y velocidad.

Supervisión y monitoreo de fallas con otros sub-sistemas.  
 Controla la referencia de velocidad y potencia.  
 Controla la generación del registro de señales y eventos.  
 Controla el rampeamiento y toma de carga.

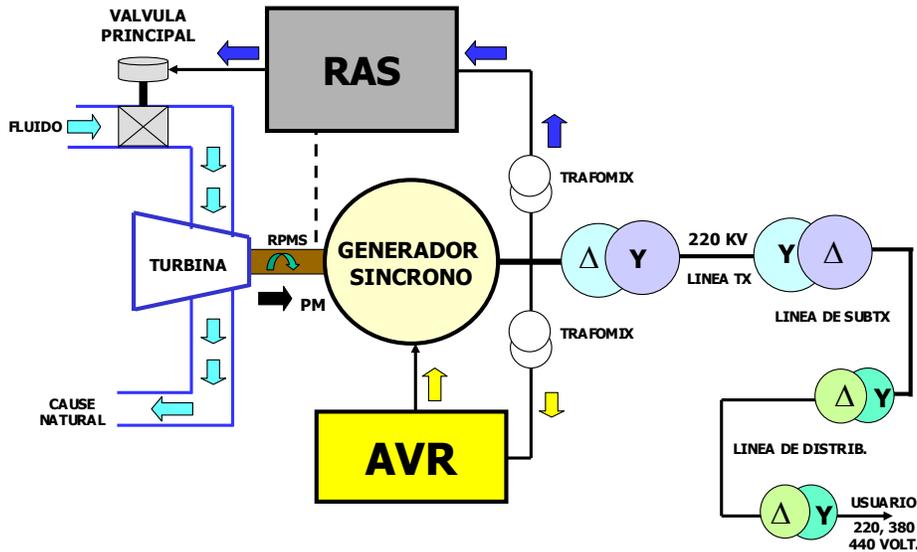


Figura N° 1.8.- Esquema general de un Sistema Eléctrico de Potencia

### 3.7.- MATERIALES FERROMAGNÉTICOS

Se caracterizan porque delimitan y dirigen los campos magnéticos en trayectorias bien definidas, sus propiedades magnéticas y aplicación se dividen: Magnéticamente blandos y duros.

Los materiales ferromagnéticos blandos (hierro, níquel, silicio y cobalto) utilizados en máquinas eléctricas y transformadores, deben reunir un mínimo de condiciones elementales tal como: alta permeabilidad, baja fuerza coercitiva y pequeñas pérdidas por histéresis. En nuestro caso se utilizan los materiales magnéticamente blandos aleados: Hierro - carbono y Hierro - Silicio.

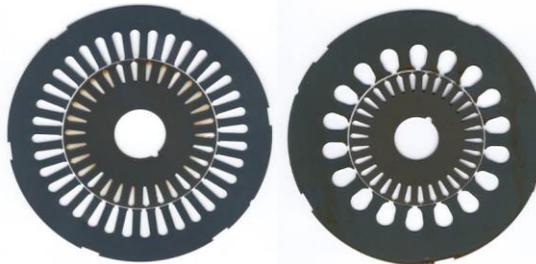


Figura N° 1.9.- Materiales ferromagnéticos de acero al silicio.

Aleaciones de Hierro - Carbono.- Utilizados en la década del 60, actualmente no se utiliza por sus reducidos parámetros magnéticos.

Aleaciones de Hierro - Silicio.- Es el material predilecto para las máquinas eléctricas y transformadores, pues nos permite reducir las pérdidas en el hierro a causa de que: El silicio reacciona favorablemente con las impurezas contenidas en el hierro, aumentando la permeabilidad y reduciendo la pérdida por Histéresis.

La presencia de silicio hace que estas aleaciones aumenten su resistividad eléctrica original reduciendo las pérdidas por las corrientes de Eddy. Los fabricantes de chapas magnéticas de diversos países han normalizado su producción y sus cartas técnicas, no difieren sensiblemente unos de otros.

### 3.8.- MATERIALES AISLANTES

Presentan una resistividad muy elevada debido a las corrientes de fuga que circulan en forma transversal y superficial. Las clases de aislamiento de las máquinas eléctricas y sus respectivos límites de temperatura según las normas IEC son las siguientes:

Tabla N° 1.1.- Clasificación de los materiales aislantes según IEC 34 - 1

Clases de aislamiento	Y	A	E	B	F	H	C
Temperatura ambiente C°	40	40	40	40	40	40	40
Sobre elevacion máxima de temperatura C°	45	60	75	80	100	125	#
Diferencia máxima entre el punto mas caliente y el bobinado ó sistema conductor	5	5	5	10	15	15	15
Temperatura límite C°	90	105	120	130	155	180	&

# Temperaturas mayores a 125° C.

& Temperaturas superiores a 180° C.

La temperatura ambiente debe ser no máximo de 40° C., por encima de esta T. ambiente las condiciones de trabajo son consideradas especiales. Las normas por tanto especifican (para máquinas eléctricas) un máximo de temperatura ambiente y una sobre elevación máxima para cada clase de aislamiento. De este modo se fija indirectamente el punto mas caliente.

Los valores numéricos y la composición de la temperatura admisible del punto mas caliente están indicados en la tabla anterior. Para alternadores de construcción naval deberán de cumplirse las normas internacionales establecidas para este caso. Para alternadores usados en locales húmedos y calientes deberán utilizarse aislamientos tropicalizados caracterizados por tener una buena resistencia contra la humedad y soportar altas temperaturas ambientes.

Las principales características son:

Eléctricas.- Resistencia de aislamiento, rigidez dieléctrica, constante dieléctrica y factor de potencia.  
 Mecánicas.- Resistencia a la tracción, comprensión, cortadura, flexión y choque.  
 Físicas.-

Esencialmente son el peso específico y porosidad.  
Calor específico, conductividad térmica y temperatura de seguridad.

Térmicas.-

Las normas internacionales clasifican a los materiales aislantes tal como sigue:

**El mylar** es un film polyester y está hecho de tereftalato de polietileno, que es de polímero formado por la reacción de condensación de etilenglicol y del ácido tereftálico; es un material aislante de clase B.



Figura N° 1.10.- Materiales aislantes y conductores

**El nomex** es fabricado a base de fibras cortas de pequeñas partículas fibrosas liantes de aramid (polyamida aromático), esto produce un papel sintético flexible y sólido que posee las excelentes propiedades eléctricas, térmicas, químicas y mecánicas; es un material aislante clase H. Estos materiales se presentan en los siguientes espesores: 0.15 , 0.20, 0.25, 0.30 y 0.35 mm, respectivamente.

**El nomex-mylar-nomex** está compuesto por un film de polyester MILAR revestido en sus dos caras por NOMEX, tiene una temperatura de operación clase "F" 155° C. y goza de muy buenas propiedades eléctricas, mecánicas, térmicas y químicas.

Espesor (mm)	Rigidez dieléctrica (KV/mm)	Constante dieléctrica 1Khz	Tensión de perforación (Kv)
0.13	27	2.3	7
0.18	33	2.5	9
0.25	34	2.6	12
0.30	34	2.8	15
0.38	34	3.0	20

**Aislamientos de ranura.-** Se trata de los materiales con los que se aíslan las ranuras del paquete magnético estático, se incluyen los separadores de medio canal, cabezas de bobinas y tejas. En el mercado se encuentran los siguientes papeles aislantes:

- . Nomex aislamiento clase H (180° C)
- . Sumitherm aislamiento clase F (155° C)
- . Thermomid 2004 aislamiento clase "F"
- . Hostatherm aislamiento clase "F"

**Tubos aislantes (spaguettys).-** Usados en las conexiones realizadas en las cabezas de bobina, entre grupos y conexión de cables flexibles que conectan a los arrollamientos con el tablero de bornes. Encontramos este tipo de diversas marcas y colores, siendo sus características más importantes las que siguen:

- . Tubito tejido de polyester impregnado con poliuretano.
- . Rigidez dieléctrica en seco 2 Kv/mm durante un minuto.
- . Temperatura de operación 155° C (clase F).
- . Presentación de 0.8 mm a 24 mm de diámetro interior.
- . Resistencia mecánica DIN 40620.
- . Los más utilizados son:
  - Revitex con aislamiento clase F y H.
  - Tramacril con aislamiento clase F y H.
  - Fibra de vidrio siliconado con aislamiento clase H.

**Cintas de amarre.-** Empleados en el amarre de las cabezas de las bobinas, así mismo en la protección de las uniones soldadas de los cables de salida correspondientes al L.A. y L.O.A.; presentan las siguientes características:

- . Tejido de vidrio finísimo con película de polyester.
- . Alta rigidez dieléctrica.
- . Temperatura de operación 155° C (clase F).
- . Alta resistencia mecánica.
- . Entre las usadas tenemos:
  - Cinta de polyester, polyglas ó scotchply.
  - Cinta de fibra de vidrio sumica.



Figura N° 1.10.- Materiales aislantes utilizados en los bobinados trifásicos

**Barniz segmentante de impregnación.-** La finalidad es de proteger a los aislantes de fuertes y frecuentes vibraciones electromecánicas y presentar un camino mas compacto para la circulación del calor.

Sus características más importantes son:

- . Viscosidad a temperatura ambiente copa Ford N° 4 con 75 a 15 seg.
- . Tiempo de curado a 135° C 4 horas
- . Clasificación térmica F (155° C).

**Materiales conductores aislados.-** Según sus propiedades tenemos solamente dos tipos de materiales conductores que serán analizados a continuación.

**Alambres esmaltados.-** Se utiliza cobre refinado electrolítico con 99.96% de pureza, temple blando según normas de fabricación ASTM - B3 y NEMA 1000 MW SECCION 30 - C y tiene doble capa de esmalte a base de poliéster clase "F" y poliéster - amida para la clase "H". Para máquinas grandes estos materiales son platinas de cobre de temple duro aisladas convenientemente con materiales aislantes clase H ó por lo menos F.

De acuerdo con las normas internacionales recomiendan hacer como mínimo los siguientes ensayos: dimensiones, adherencia, flexibilidad, elongación, choque térmico, capacidad dieléctrica y control de la resistencia a la abrasión.

**Cables de conexión.-** Se utilizan para unir el circuito eléctrico interno de la máquina y conectar al circuito exterior de fuerza. Está compuesto de los siguientes materiales:

Cobre refinado electrolítico con 99.96% de pureza.

Es aislado con cloruro de vinilo modificado y una trenza de fibra de vidrio impregnada en siliconas y/o barniz de alta temperatura.

La tensión de servicio es de 1 KV, siendo la temperatura de servicio 155° C. Presentación de: 150 a 0.5 mm<sup>2</sup>.

Según VDE 0472 recomienda realizar los siguientes ensayos:

Tensión de ensayo en seco y continuo a 3000 voltios.

Como hemos visto que los materiales aislantes dependen directamente de la temperatura y del tipo de material de impregnación. Para fines de normalización los materiales aislantes y los sistemas de aislamiento (cada uno formado por la combinación de otros materiales) son agrupados en clases de aislamiento cada cual definido por su respectivo límite de temperatura, o sea por la mayor temperatura que el material puede soportar continuamente sin que sea afectado su vida útil.

### **3.9.- OTROS MATERIALES**

Se refiere al conjunto de materiales que son utilizados en la construcción de las máquinas síncronas. Estos son los siguientes:

**Eje.-** Es el elemento que transmite la potencia mecánica desarrollada por el motor primo; tenemos dos tipos de ejes que son frecuentemente utilizados:

- . SAE 1045, 1040, 1060.
- . VCL 100, 150.

En las puntas de los ejes es maquinado una ranura axial realizada para el alojamiento de la chaveta cuyas dimensiones están de acuerdo con la norma IEC publicación 72 1971 y ABNT NBR 5432. Las chavetas están de acuerdo con las normas DIN 6885 y ABNT EB 122 y son siempre abastecidas con la máquina.

**Rodamientos.**- Son elementos que conjuntamente con el eje-rotor forman la parte móvil de las máquinas rotativas. Podemos señalar que los rodamientos están conformados por:

Elementos rodantes

- Jaula metálica ó PVC especial.
- Bolas ó rodillos de acero.

Elementos fijos

- interno y
- Anillo externo.

Anillo

Los rodamientos si se manipulan adecuadamente pueden dar un funcionamiento fiable en una amplia gama de condiciones de trabajo, pero pueden dañarse si el manipuleo es incorrecto. A continuación se señalan algunas precauciones para la manipulación adecuada de los rodamientos:

- Mantener limpio los rodamientos y la zona de trabajo. -
- No exponer los rodamientos a temperaturas altas ( $T_{max} = 110^{\circ} C$ ). -
- Utilizar las herramientas adecuadas para su manipulación. -
- Los rodamientos deben ser manipulados por personal adiestrado. -
- Protegerlos contra la humedad, polvo y cuerpos extraños. -
- Si se monta un reten exigir que la pista del eje esté bien rectificado.

### **Métodos para detectar defectos en los rodamientos:**

Los métodos indicados a continuación pueden aplicarse fácilmente, insitu no necesitando ser desmontados, pudiendo ser los siguientes:

- Comprobación mediante ruidos.
- Verificación de la temperatura de trabajo.
- Análisis del estado del lubricante.
- Aplicando un análisis vibracional.

**Otras partes.**- Entre las otras partes podemos encontrar las siguientes:

- . Ventilador o sistema de ventilación.
- Escudos en L.O.A y L.A.
- Caja de conexiones y pernería en general.

**Formas constructivas.**- Se entiende por forma constructiva la disposición de las partes componente de las máquinas en relación a su fijación. Las máquinas son construidas según la norma IEC (International Electrotechnical Commission) y NEMA MG1-4.03 (National Electrical Manufacturers Association). Son éstas las que determinan la forma constructiva, dimensiones, grado de protección, y potencias entre otras características.

**IDENTIFICACION DE LAS MAQUINAS SINCRONAS**

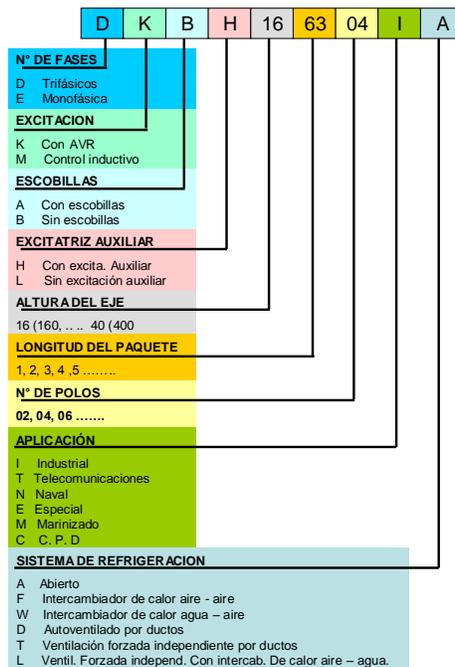


Figura N° 1.11.- Identificación de las máquinas síncronas

**4.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO**

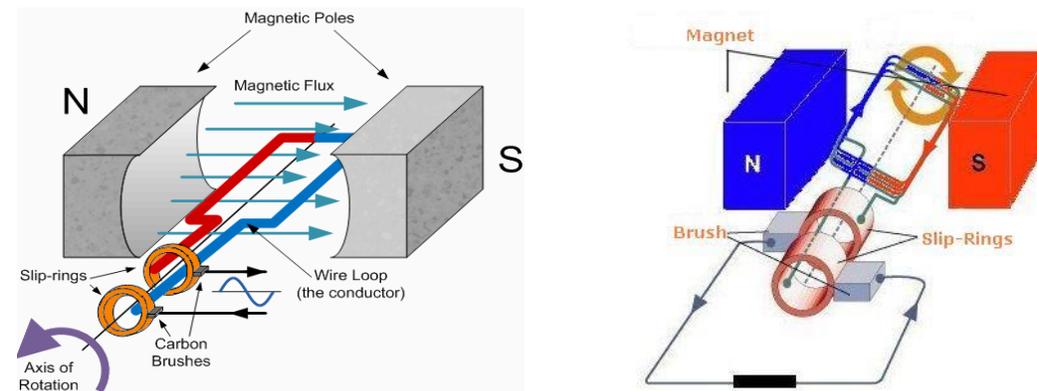


Figura N° 1.11.- Conformación de un sistema de generación monofásico

La tensión inducida en la bobina giratoria se puede extraer y alimentar una carga monofásica

El campo magnético podría estar siendo generado por bobinas en el estator o en el rotor

Si el campo magnético dá una revolución por segundo, estaría induciendo en la bobina una corriente alterna de 1 ciclo por segundo.

Para que genere una tensión de 60 ciclos por segundo el rotor debería rotar a 3600 revoluciones por minuto. A esta velocidad se le denomina velocidad síncrona.

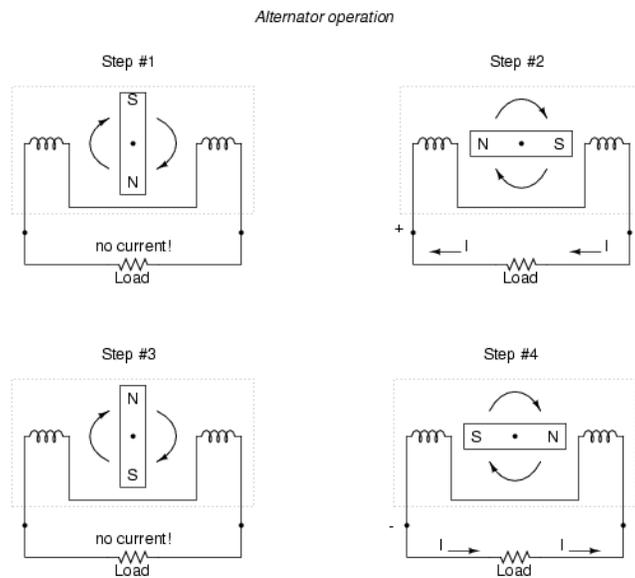


Figura N° 1.12.- Pasos para generar corriente alterna monofásica

Si el campo tiene cuatro polos N S N S, entonces en cada revolución habrá completado dos ciclos, si su velocidad es de 1 vuelta por segundo, la tensión generada será de 2 hertz. En este caso, para generar una frecuencia de 60 hertz, la velocidad síncrona de este generador será de 1800 revoluciones por minuto.

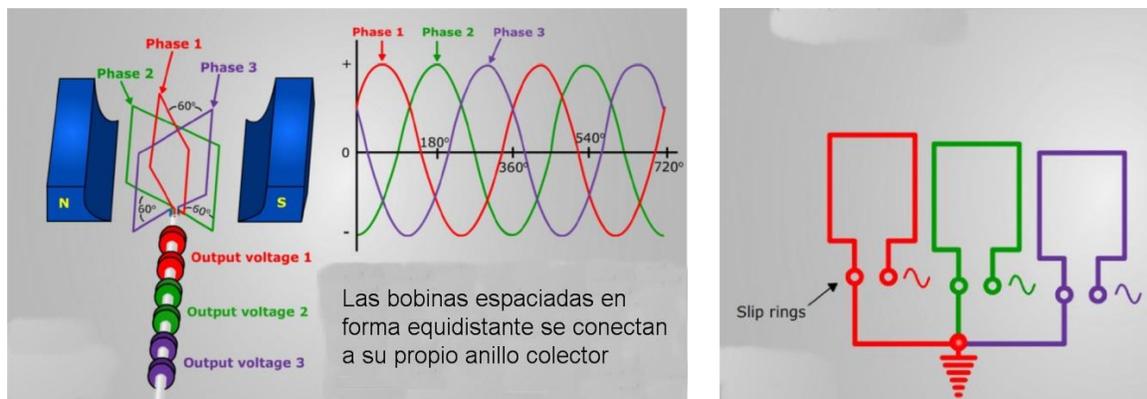


Figura N° 1.13.- Generación de corriente alterna trifásica

Si el generador tiene 12 polos en cada revolución habrá producido 6 ciclos. Para producir 60 hertz requerirá girar a 10 revoluciones por segundo o 600 RPM. Para este generador, su velocidad síncrona será de 600 RPM.

Las altas velocidades son propias para maquinas propulsadas por turbinas a gas o a vapor y las velocidades síncronas bajas son propias de maquinas lentas tipo grupos diesel.

En el caso de un generador trifásico se usan tres bobinas igualmente separadas y cada bobina genera una tensión sinusoidal desfasada 120 grados una de la otra. 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 los generadores sincrónicos sucede que:**

Rotor alimentado con corriente continua a través de anillos deslizantes el cual produce campo  $B_f$ .

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

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

$$f = P \times W_r / 2 \times \pi$$

Donde:

- f : frecuencia de las tensiones inducidas en el estator.
- $W_r$  : velocidad de giro del rotor
- P : número de pares de polos.

Al conectar una carga trifásica circulan corrientes trifásicas por el devanado del estator, esto da origen a un campo giratorio de reacción del estator.

El campo giratorio producido por las corrientes circulantes del estator es el campo de reacción del inducido.

En forma general podemos afirmar que:

El devanado inductor (el que induce las tensiones) es el rotor.

El 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.

### **En los motores sincrónicos sucede que:**

Rotor alimentado con corriente continua produce campo  $B_f$  estacionario con respecto al rotor.

Estator alimentado con corrientes trifásicas producen un campo giratorio a la velocidad:

$$W_s = 2 \times \pi \times f / P$$

Donde:

- $W_s$  : Velocidad a la que gira el campo del estator.
- f : Frecuencia de las corrientes por el estator.
- P : número de pares de polos.

El torque de los motores síncronos esta dado por:

$$T_e = K \cdot B_{est} \cdot B_{rotor} \cdot \text{Sen } \delta_T$$

$$T_e = K \cdot FMM_{est} \cdot FMM_{rotor} \cdot \text{Sen } \delta_T$$

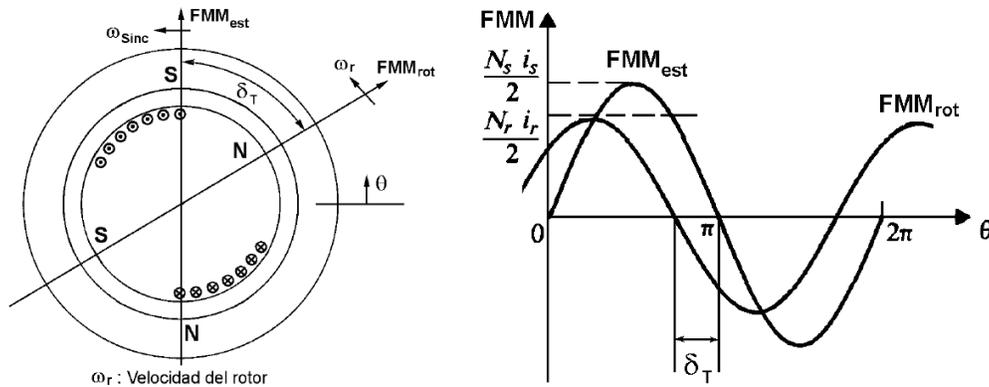


Figura N° 1.14.- Interacción de los campos magnéticos en las máquinas síncronas

El motor síncrono desarrolla  $T \neq 0$  cuando  $W_r = W_s$

Además el motor síncrono no puede arrancar en forma autónoma.

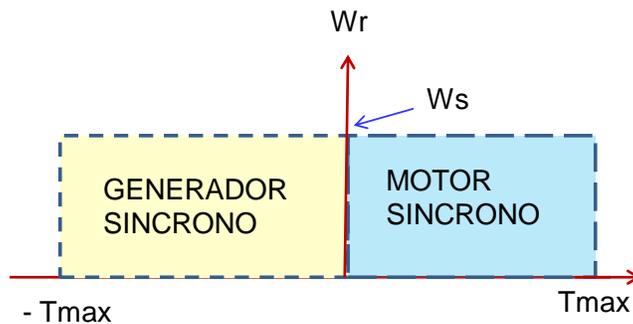


Figura N° 1.15.- Características velocidad – torque de las máquinas síncronas

Las máquinas síncronas están constituidas básicamente de materiales ferromagnéticos, aislantes, conductores aislados y accesorios diversos. Para su mejor entendimiento y comprensión he creído conveniente hacer una ligera descripción de los componentes eléctricos y mecánicos que conforman las máquinas síncronas; en tal sentido, es que pasamos a describir a continuación.

La característica principal de un generador eléctrico **es transformar la energía mecánica en eléctrica**. Para facilitar la comprensión del principio de funcionamiento consideremos una espira inmersa en un campo estático producido por un imán permanente. El principio básico de funcionamiento está basado en el movimiento relativo de una espira (movido por un motor

primo) y el campo magnético. Los terminales de la bobina están en contacto con dos anillos rozantes, instalados en el eje del rotor del generador síncrono, mediante dos escobillas.

El motor primo proporciona la potencia mecánica a velocidad constante y según la ley de inducción de Faraday podemos afirmar que:

$$e = B.l.v.Cos\theta \quad \text{Voltios}$$

Donde:

e = Valor instantáneo de la fuerza electromotriz (f.e.m).

B = Inducción del campo magnético.

l = Longitud de la espira de cada conductor.

v = Velocidad lineal del conductor en relación al campo magnético.

$\theta$  = Es el ángulo formado por B y v.

Para N espiras tendremos  $e = N.B.l.v.Cos\theta$  Voltios

La variación de la f.e.m. en un conductor en función del tiempo es determinada por la ley de distribución de inducción magnética sobre un polo. Esta distribución tiene un estudio complejo y depende de la zapata polar, y con un diseño conveniente de la zapata podremos obtener una distribución senoidal de las tensiones inducidas.

Cada vuelta de 360 grados tenemos un ciclo completo de tensión generada para una máquina de un par de polos. Los arrollamientos pueden ser construidos con un número mayor de par de polos que se distribuyen alternativamente. En este caso tenemos un ciclo para cada par de polos, siendo "n" la rotación de la máquina en RPM y la frecuencia en ciclos por segundos (Hertz) tenemos:

$$RPM = (120.F) / p$$

Donde el número de polos de la máquina tendrá que ser siempre par.

Tabla 1.3.- Velocidades Síncronas Normalizadas		
Nº de polos	60 Hertz	50 Hertz
2	3600	3000
4	1800	1500
6	1200	1000
8	900	750
10	720	600
12	600	500
16	450	375
18	400	---
20	360	300
24	300	250
30	240	200

El sistema trifásico está formado por la asociación de tres sistemas monofásicos de tensiones R, S y T desfasados de 120 grados. El bobinado de este tipo de generador está constituido por tres conjuntos de bobinas dispuestas en el espacio, formando entre sí también un ángulo de 120 grados eléctricos.

Para que el sistema sea equilibrado esto es necesario  $N_R = N_S = N_T$  (el número de espiras en cada bobina deben ser iguales).

La conexión Y es la mas utilizada en los grandes generadores síncronos instalados en nuestro sistema interconectado.

## 5.- TENSIÓN INDUCIDA GENERADA

Si se incrementa la corriente de excitación  $I_f$ , el flujo magnético principal  $\Phi_f$  se incrementa, de tal manera que la tensión generada  $E_{af}$  también de incrementa. Cabe recordar que la característica magnética del núcleo magnético no es lineal, por lo tanto no existe una relación estrictamente lineal entre la corriente de excitación y el flujo magnético, tal como se muestra en la figura mostrada a continuación. En ella apreciamos que se presentan tres zonas, ellas son:

- La zona lineal.
- La zona del codo de saturación.
- La zona saturada.

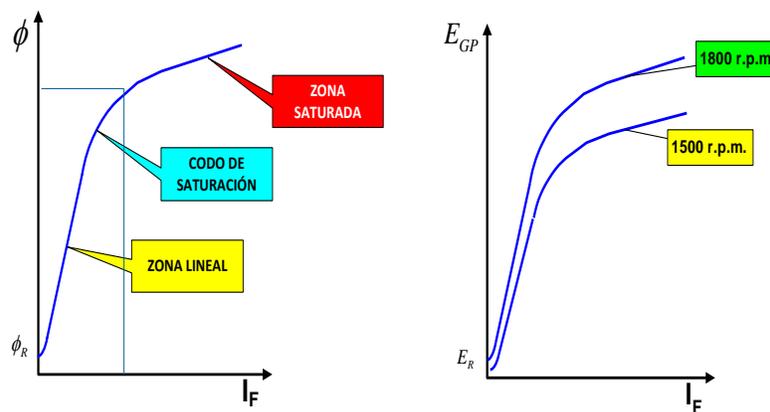


Figura N° 1.16.- Características de la curva de magnetización

Podemos visualizar también que la tensión inducida  $E_{af}$  varía en forma proporcional a la velocidad.

Un incremento del flujo lleva a un incremento proporcional a la tensión generada.

Así mismo, un incremento de la velocidad de giro, se incrementa la tensión generada en forma proporcional.

En consecuencia  **$E_{af} \propto \Phi_f$  y  $E_{af} \propto \text{RPM}$**

La tensión generada depende de:

- Número de polos.
- Características geométricas del rotor y estator.
- Número de espiras.
- Método de diseño.
- Tamaño del generador
- Velocidad del motor primo
- Tipo y clase de hierro silicoso.
- Materiales aislantes.

Como se puede notar todas éstas características conforman la parte constructiva de la máquina, pero finalmente éstas características son fijas y constantes, por lo tanto podemos concluir:

La tensión generada en el devanado del estator (devanado del inducido), depende del flujo magnético principal, de la velocidad y del aspecto constructivo de la máquina.

$$E_{af} = k \cdot \Phi_f \cdot \text{RPM}$$

Asimismo, cabe recalcar que la frecuencia de esta tensión generada, depende de la velocidad, y del número de polos de la máquina. Dicha frecuencia se puede determinar mediante la siguiente relación:

$$F = p \cdot \text{RPM} / 120$$

Donde:

F	=	frecuencia de la red (Hz).
RPM	=	velocidad de giro en r.p.m.
$\Phi_f$	=	flujo magnético principal (Wb)
p	=	número de polos de la máquina.
$I_f$	=	Corriente de campo (A).
$E_{af}$	=	tensión generada por fase (V o KV).
K	=	constante que depende del aspecto constructivo de la máquina.

Cabe indicar que no toda el flujo creado por el devanado de campo se concatena completamente en el circuito del estator, si no que parte se pierde a través del aire. Así mismo cuando se conecta una carga a los terminales del generador, circula corriente por el devanado de estatórico, creando este devanado un flujo que reaccionará sobre el campo principal. Este flujo de reacción de armadura, depende del tipo de carga (resistivo, inductivo o capacitivo) creando magnetización o desmagnetización del generador.

Estos flujos de dispersión y la reacción de la armadura se traduce en un decremento de la tensión generada.

## 6.- MODELAMIENTO DE GENERADOR SÍNCRONO

Con la finalidad de poder realizar un estudio del comportamiento de los generadores síncronos, es que hemos escogido un modelo adecuado, el cual está representado por resistencias e inductancias inductivas. En tal sentido es que presentamos la figura N° 1.12.

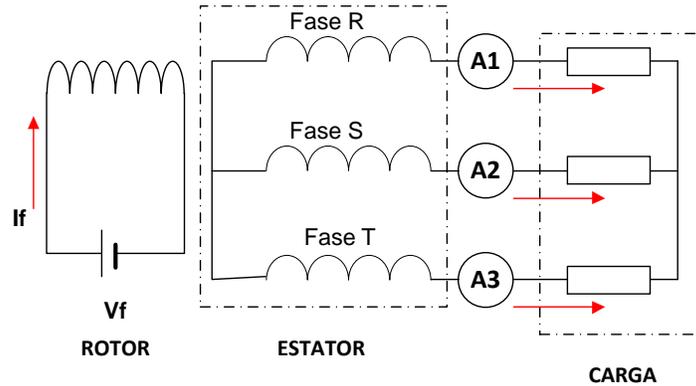


Figura N° 1.17.- Circuito equivalente de campo y estator trifásico

La suma de estos dos efectos, se puede representar en un circuito equivalente por una reactancia. A dicha reactancia se le conoce con el nombre reactancia síncrona ( $X_s$ ). Además el circuito contiene la resistencia propia del devanado de armadura  $R_A$ , la cual también provoca caída de tensión. Estos dos elementos se representan a continuación en la figura siguiente.

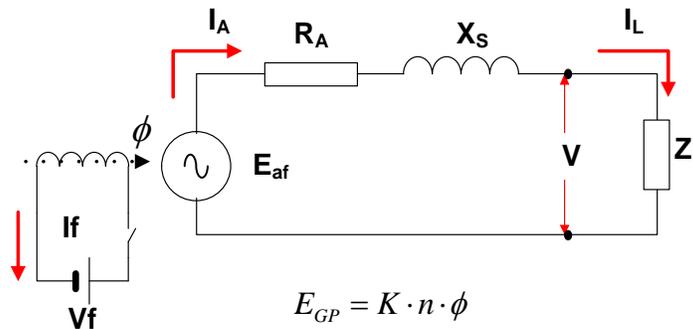


Figura N° 1.18.- Circuito equivalente monofásico

Aplicando la 2da. Ley de Kirchhoff, a la figura N° 1.13, en el circuito equivalente monofásico tenemos:

$$E_{af} = V + I_A \cdot R_A + I_A \cdot X_s$$

Todas las variables utilizadas en la ecuación anterior son vectores. En consecuencia la impedancia síncrona, tiene dos componentes, uno es la resistencia de armadura ( $R_A$ ) y el otro es la reactancia síncrona ( $X_s$ ), esto es:

$$Z_s = R_A + j X_s$$

Pero  $X_s = X_d + X_{ar}$

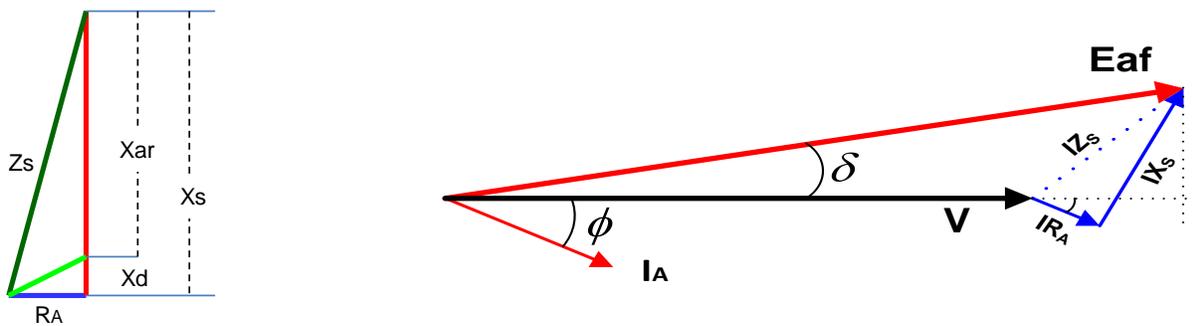


Figura N° 1.19.- Diagramas fasoriales exactas de: Impedancia, tensiones y corrientes del generador síncrono.

Donde:

- $E_{af}$  : Tensión generada por fase (V).
- $V$  : Tensión en terminales por fase (V).
- $R_A$  : Resistencia de armadura ( $\Omega$ )
- $X_S$  : Reactancia síncrona ( $\Omega$ ) .
- $I_A$  : Corriente de armadura (A).
- $I_L$  : Corriente de línea (A).
- $I_f$  : Corriente de excitación (A).
- $V_f$  : Tensión de excitación (V).
- RPM : Velocidad de rotación, igual a la velocidad síncrona ( $n_s$ ).
- $\phi$  : Flujo principal (flujo de campo)
- $X_d$  : Reactancia de dispersión ( $\Omega$ )
- $X_{ar}$  : Reactancia de reacción de la armadura ( $\Omega$ )

## 7.- ECUACION DE POTENCIA – ANGULO

La potencia suministrada por un generador síncrono puede expresarse como una función de:

- La tensión en los terminales  $V$ .
- La tensión inducida  $E_{af}$
- El ángulo de potencia ó par  $\delta$  (ángulo formado por  $V$  y  $E_{af}$ ).

En la figura N° 1.14 se muestra el diagrama fasorial de la impedancia  $Z_s = R_A + j.X_s$

Además podemos notar que la caída de tensión interna está dada por:  $\Delta V = I_A \cdot Z_s$

Como,  $X_S \gg R_A$ , entonces se suele aproximar la impedancia síncrona a la reactancia síncrona:  $X_S \cong Z_s$ , tal como se presenta en la figura N° 1.15.

En consecuencia:  $E_{af} = V + I_A \cdot X_s$  (cada variable de estos son vectores)

Para fines del tema de sistemas de potencia y para el planteamiento propuesto, ésta aproximación es muy empleada.

Cabe indicar, de la figura N° 1.14, que al ángulo ( $\delta$ ) entre los fasores de tensión  $E_{af}$  y  $V$ , se le conoce con el nombre de *ángulo de potencia*.

Del diagrama anterior notamos que:

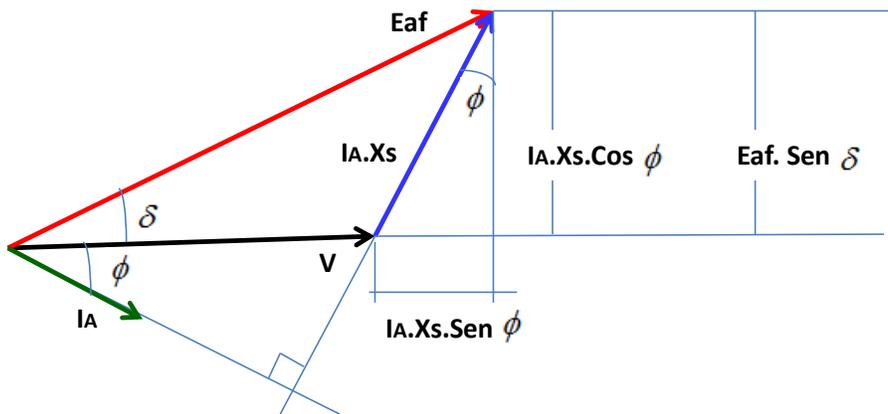


Figura N° 1.20.- Diagrama fasorial aproximado de tensiones y corrientes del G.S.

$$I_A \cdot X_s \cos\Phi = E_{af} \cdot \text{Sen } \delta$$

$$I_A \cdot \cos\Phi = (E_{af} \cdot \text{Sen } \delta) / X_s$$

Multiplicando a ambos miembros por V obtendremos:

$$V \cdot I_A \cdot X_s \cos\Phi = V \cdot E_{af} \cdot \text{Sen } \delta .$$

$$V \cdot I_A \cdot \cos\Phi = (V \cdot E_{af} \cdot \text{Sen } \delta) / X_s$$

$$P = (V \cdot E_{af} \cdot \text{Sen } \delta) / X_s \quad (\text{Potencia activa monofásica})$$

$$P = (3 \cdot V \cdot E_{af} \cdot \text{Sen } \delta) / X_s \quad (\text{Potencia activa trifásica})$$

A esta expresión se le conoce como la ecuación de potencia.

Es necesario recordar que el modelo tomado como referencia contiene parámetros de tensión y corriente de fase.

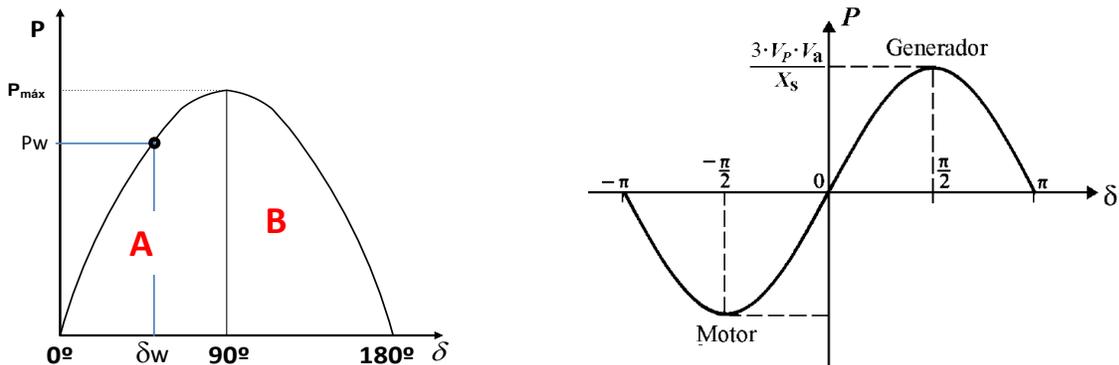


Figura N° 1.21.- Características de la curva potencia – ángulo en máquinas síncronas

De la figura N° 1.16 encontramos, bajo la curva, dos áreas:

- A es la región estable.
- B es la región inestable.
- $P_w$  es la potencia de trabajo estándar ó práctica del G.S.
- $\delta_w$  es el ángulo de trabajo práctico  $-90^\circ < \delta < +90^\circ$

Finalmente podemos afirmar que:

- Cuando  $\delta > 0^\circ$ , entonces la máquina síncrona opera como generador.
- Podemos entender que la máquina síncrona entrega ó suministra potencia.
- Cuando  $\delta < 0^\circ$ , la máquina síncrona opera como motor.
- Podemos entender que la máquina síncrona recibe ó consume potencia.

**SOLICITE SU SEGUNDO CUADERNILLO**