

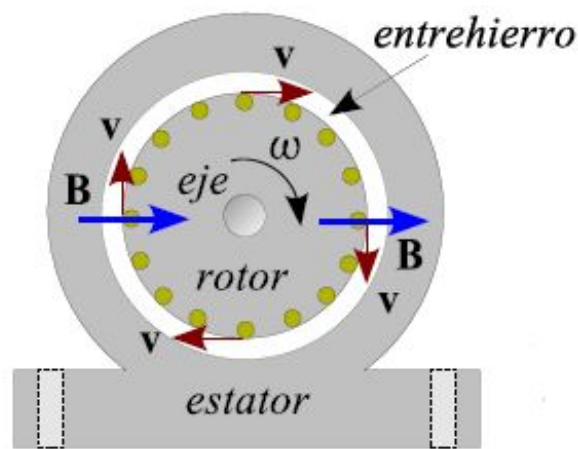
# CAPÍTULO 1

## 1.1 MÁQUINAS SINCRÓNICAS.

Se denominan máquinas de corriente alterna o CA a los generadores que transforman energía mecánica en energía eléctrica de CA y a los motores que convierten energía eléctrica de CA en energía mecánica. Existen dos tipos de máquinas de CA: las máquinas sincrónicas y las máquinas de inducción, también conocidas como máquinas asincrónicas [1]. Las máquinas eléctricas rotativas convencionales presentan las siguientes características comunes [2]:

- Poseen un eje mecánico por medio del cual se realiza el intercambio de energía;
- Tienen una pieza estática o inmóvil denominada estator;
- Tienen una pieza móvil llamada rotor, en el caso de las máquinas cilíndricas;
- Por lo general, tienen forma cilíndrica.

La Figura 1 permite visualizar la configuración cilíndrica general de una máquina de CA, vista frontal:



**Figura 1:** Configuración cilíndrica de los conductores de una Máquina de CA [2].

En las máquinas sincrónicas, la corriente del campo magnético es suministrada por una fuente de potencia CA externa, mientras que en el caso de la máquina de inducción la corriente de campo magnético se suministra a sus devanados de campo por medio de inducción magnética [1]. La bobina del rotor de la máquina sincrónica se excita mediante la inyección de una corriente continua, mientras que por las bobinas del estator circula una corriente alterna. Son estas corrientes alternas las que producen un campo magnético rotatorio que gira en el entrehierro de la máquina con la misma frecuencia angular de las corrientes de armadura [2].

La Figura 2 muestra las partes de una máquina sincrónica real, con rotor de polos salientes, construida en una central de generación eléctrica:



**Figura 2:** Estator y Rotor de Polos Salientes de una Máquina Sincrónica [2].

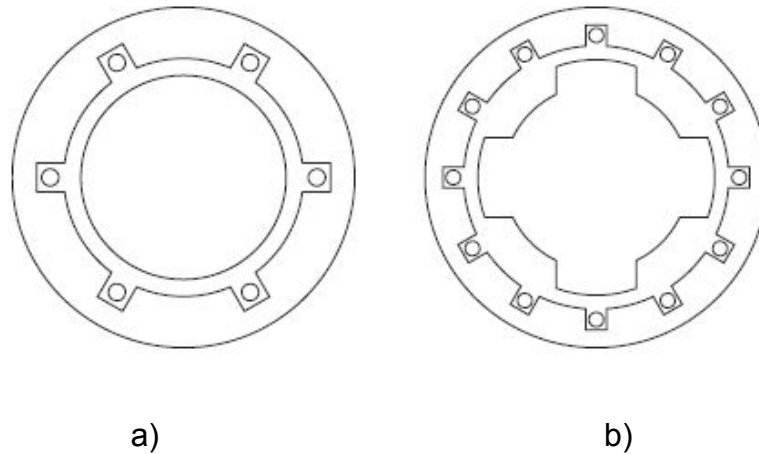
La rapidez de una máquina sincrónica bajo condiciones de estado estacionario, es proporcional a la frecuencia de la corriente que circula en su inducido o armadura. El rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético de rotación que produce la corriente del inducido, de allí el término de máquina sincrónica, obteniéndose como consecuencia un par estacionario [3]. Las máquinas sincrónicas son comúnmente utilizadas como generadores en grandes sistemas de potencia tales como turbinas o centrales hidroeléctricas. Por su parte, debido a que la velocidad del rotor es proporcional a la frecuencia de excitación, los motores sincrónicos son utilizados en

aplicaciones donde un variador de velocidad constante sea requerido [4]. Los objetivos al modelar una máquina síncrona pueden dividirse en dos grandes grupos: para lograr una mayor comprensión del complejo comportamiento electro-magnético de la máquina; para la simulación o análisis de sistemas de control.

Haciendo uso de los métodos de elementos finitos o FEMs (*Finite Element Methods*) es posible obtener una descripción electromagnética bastante precisa de la máquina síncrona. Sin embargo, dichos métodos presentan los siguientes inconvenientes: el tiempo de cálculo durante la simulación y el gran número de parámetros de la máquina eléctrica. Es por ello que los métodos FEM son más útiles durante la etapa de diseño [4].

Las máquinas síncronas vienen en muchos tamaños y formas, desde motores síncronos miniaturas de imán permanente hasta las más grandes turbinas que trabajan con vapor para generar electricidad, con capacidad de hasta 1500 MVA. Sin embargo, las máquinas síncronas pueden ser de dos tipos [5]: de campo magnético estacionario; de campo magnético rotatorio.

El rotor de la máquina síncrona puede ser cilíndrico, como se representa en la Figura 3a, o puede tener caras polares proyectadas hacia afuera de su superficie, como se diagrama en la Figura 3.b:



**Figura 3:** a) Máquina síncrona de rotor cilíndrico o de polos no salientes; b) Máquina síncrona con rotor de polos salientes [1].

### 1.1.1 APLICACIONES DE LAS MÁQUINAS SÍNCRONICAS.

La máquina síncrona utilizada como generador de CA e impulsada por una turbina para transformar energía mecánica en energía eléctrica, es la principal fuente de generación de potencia eléctrica en el mundo [6].

Los generadores síncronos usualmente trabajan juntos o en paralelo, formando parte de sistemas de potencia de grandes dimensiones físicas, como el que se muestra en la Figura 4, los cuales proveen de energía a las industrias, las áreas comerciales y residenciales de las grandes ciudades [7]. Para este tipo de aplicaciones, los generadores síncronos son construidos de gran tamaño, con rangos de potencia que van desde decenas hasta cientos de megawatts. Para máquinas de alta velocidad los principales impulsores son turbinas que emplean recursos fósiles o energía nuclear. Las máquinas de baja velocidad por lo general utilizan la energía hidráulica o eólica, la cual mueve enormes turbinas. Los generadores síncronos más pequeños son utilizados generalmente para atender sectores privados y sus principales propulsores son los motores diésel o las turbinas de gas.



**Figura 4:** Aplicaciones de las máquinas sincrónicas. Generación Eléctrica [8]

Por su parte, los motores sincrónicos son fabricados para atender necesidades específicas, según cada aplicación [9]. De acuerdo con sus características constructivas, alto rendimiento operativo y su adaptabilidad a múltiples ambientes de trabajo, los motores sincrónicos son utilizados en prácticamente todos los sectores industriales, entre los que resaltan:

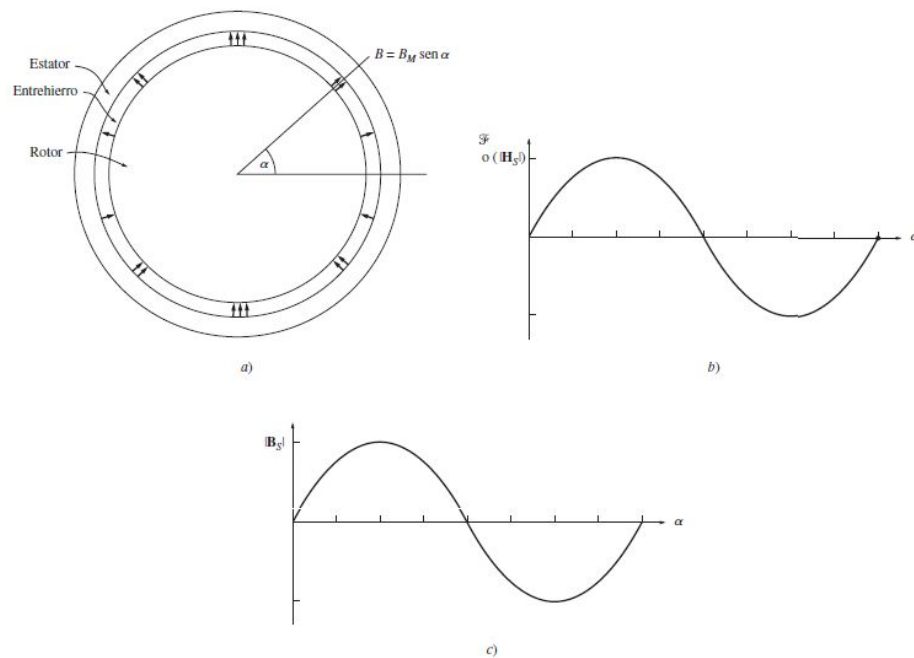
- Minería: chancadoras, molinos, cintas transportadoras;
- Siderurgia: laminadoras, ventiladores, bombas y compresores;
- Papel y celulosa: extrusoras, picadoras, desfibradoras, refinadoras;
- Saneamiento: bombas;
- Química y petroquímica: compresores, ventiladores, extractores, bombas;
- Cemento: chancadoras, molinos, cintas transportadoras;
- Goma: extrusoras, molinos, mezcladoras;
- Transmisión de energía: compresores sincrónicos.

Las principales ventajas en el uso de los motores sincrónicos se resumen a continuación [9]:

- Corrección del factor de potencia: los motores sincrónicos permiten corregir el factor de potencia en la red eléctrica donde se instalan, ofreciendo de esta manera mejor rendimiento y reduciendo los costos de energía;
- Velocidad constante: tanto en situaciones de sobrecarga como en aquellas donde ocurren oscilaciones de tensión, respetando los límites del conjugado máximo (*pull-out*);
- Alta capacidad de torque: proyectado con alta capacidad de carga, cuyas variaciones no menoscaben su capacidad para mantener la velocidad constante;
- Mayor estabilidad cuando se utiliza junto con convertidores de frecuencia: puede operar en un amplio rango de velocidad a pesar de las variaciones en la carga.
- Alto rendimiento: mayor eficiencia en la conversión de energía eléctrica en mecánica. El motor sincrónico es proyectado para operar con alto rendimiento, con mayor provecho de energía para gran variedad de carga.

## 1.2 MÁQUINAS DE ROTOR CILÍNDRICO.

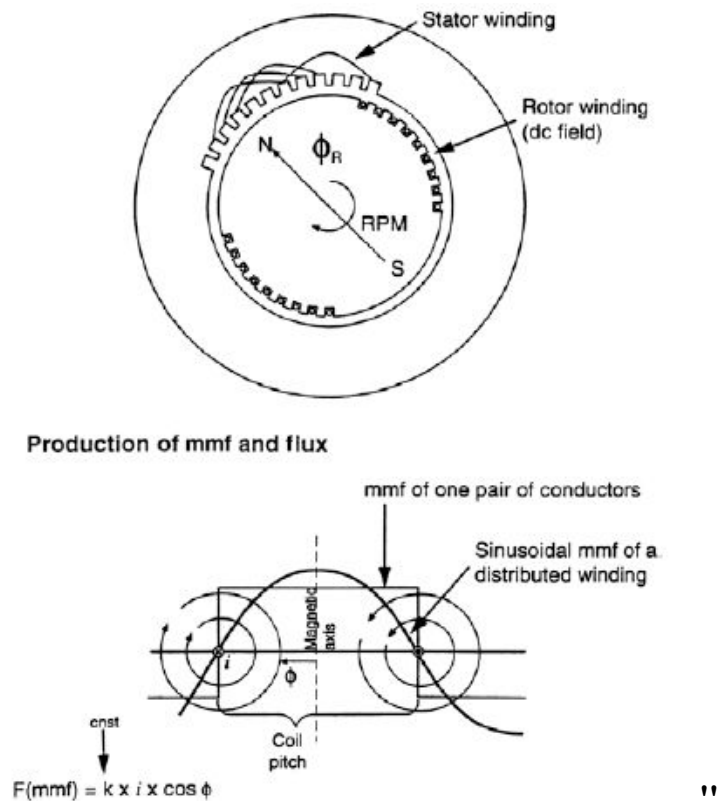
En la máquina de rotor cilíndrico de la Figura 3.a la reluctancia del entrehierro es mucho más alta que las reluctancias en el rotor y en el estator. En consecuencia, el vector de densidad de flujo  $D$  toma el camino más corto a través del entrehierro, por lo que salta perpendicularmente entre el rotor y el estator [1]. Esta densidad de flujo debe variar sinusoidalmente para permitir a la máquina producir un voltaje sinusoidal. A su vez, para que  $D$  presente una forma sinusoidal, también debe variar sinusoidalmente la intensidad de magnetización  $J$  a lo largo de la superficie del entrehierro, tal como se muestra en la Figura 5:



**Figura 5:** a) Rotor cilíndrico con densidad de flujo del entrehierro variando sinusoidalmente; b) Intensidad del campo magnético en función del ángulo  $\alpha$  del entrehierro; c) Densidad del flujo magnético en función del ángulo  $\alpha$  del entrehierro [1].

Los rotores cilíndricos se utilizan en máquinas de dos o cuatro polos y muy rara vez en máquinas de seis polos. Por lo general son impulsados por vapor o turbinas de combustión [5].

Durante la construcción de una máquina síncrona de rotor cilíndrico, tanto los devanados del rotor como del estator son instalados en ranuras y distribuidos alrededor de la periferia de la máquina [5]. La Figura 6 ofrece una corte transversal de una máquina síncrona de rotor cilíndrico, además de la corriente producida por un par de conductores en comparación con la corriente  $k$  producida por devanados distribuidos (*Stator and Rotor Winding*). Se muestra además la ecuación de la fuerza magnetomotriz resultante en función de la corriente producida y el ángulo  $\phi$ .



**Figura 6:** Sección transversal de una máquina síncrona de rotor cilíndrico. Fuerza magnetomotriz generada por la corriente producida en los devanados distribuidos en el estator y el rotor [5].



### 1.3 MÁQUINAS DE POLOS SALIENTES.

La onda de la fuerza magnetomotriz de una máquina con entrehierro uniforme, produce un flujo de magnetización que se comporta de manera independiente a la alineación espacial de dicha onda con respecto a los polos del campo. La máquina de polos salientes permite determinar la dirección de magnetización según se prefiera, gracias a que se hace sobresalir los polos del campo. La penetración a lo largo del eje polar es mayor que a lo largo del eje interpolar. A la primera se le llama eje directo del rotor, mientras a la segunda se le llama eje de cuadratura del rotor [3].

Una máquina síncrona trifásica de un par de polos salientes, con sus devanados de campo y de armadura, se ilustra en la Figura 7, donde además se representan el eje directo y el eje de cuadratura:

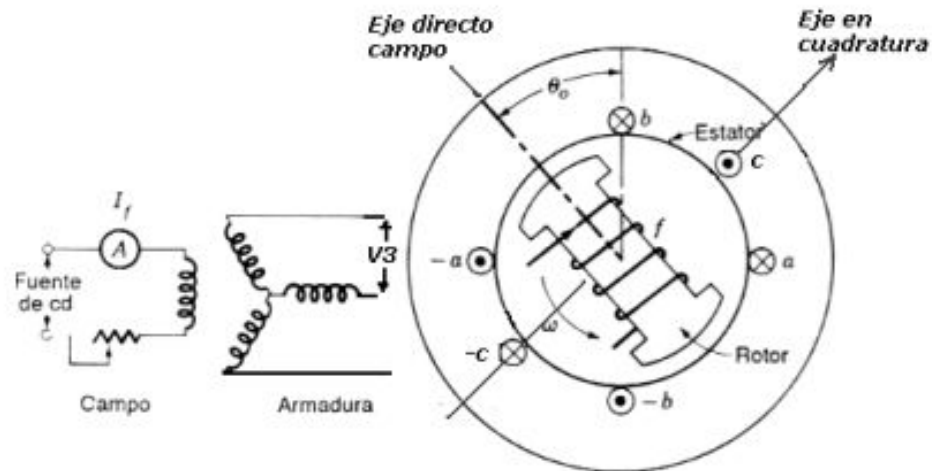
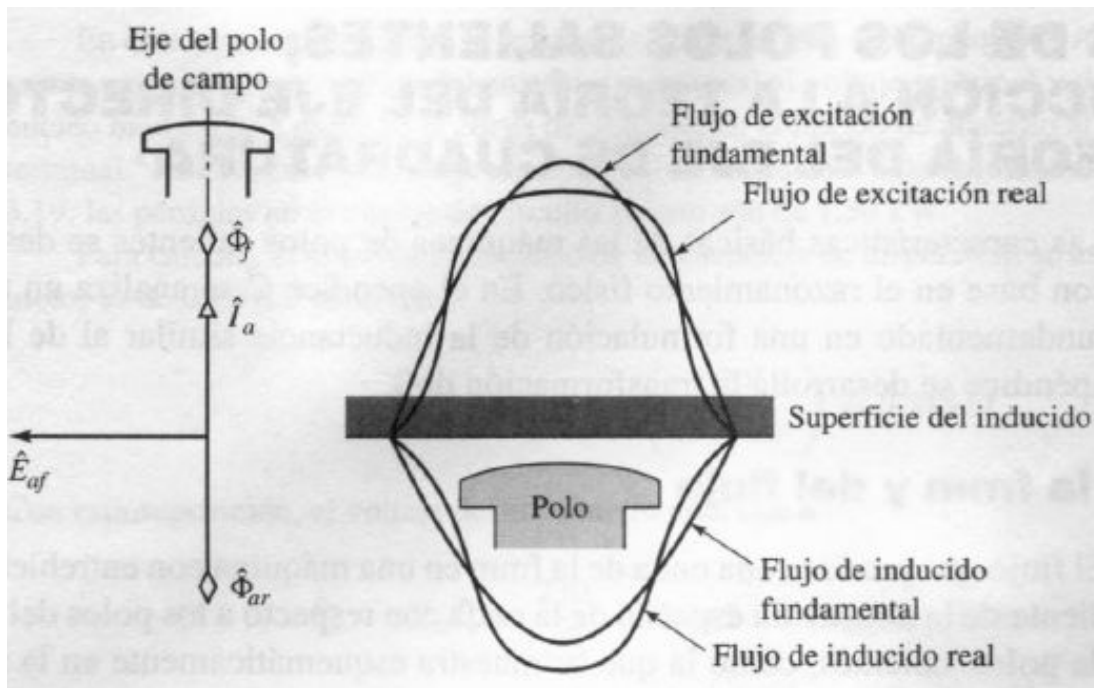


Figura 7: Máquina síncrona de polos salientes [10].

Por definición, el devanado de campo produce un flujo que se orienta a lo largo del eje directo del rotor. Por ello, en un diagrama fasorial la fuerza electromotriz del

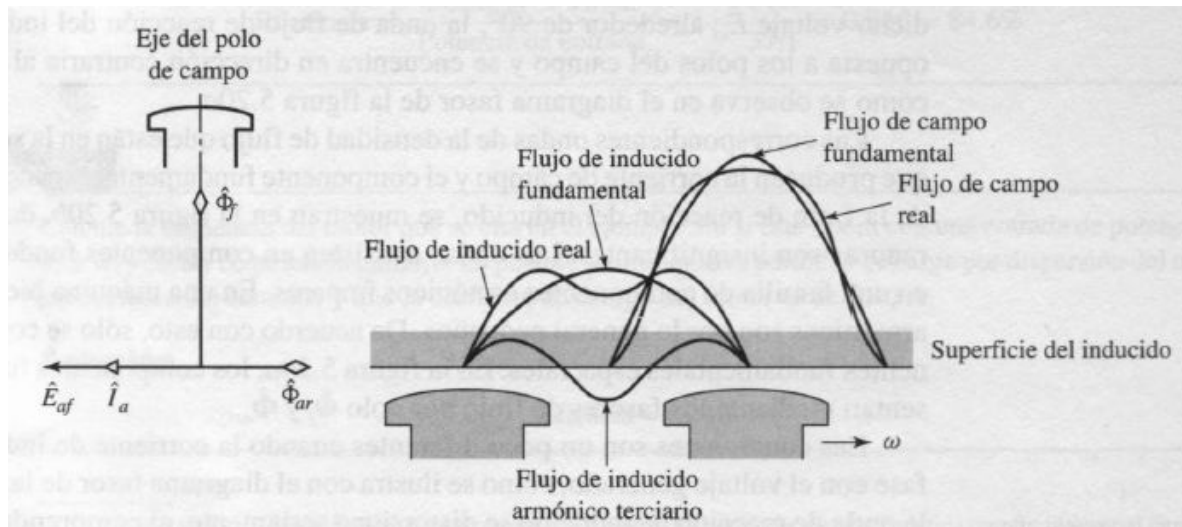
devanado de campo y su flujo magnético correspondiente  $\Phi_h$  se encuentran a lo largo del eje directo del rotor, como se muestra en la Figura 8:



**Figura 8:** Flujo del entrehierro del eje directo en una máquina síncrona de polos salientes [3].

En la Figura 8 se observa además el voltaje interno generado  $G_{ch}$ , desfasado  $90^\circ$  del flujo  $\Phi_h$ ; así como la onda de flujo de reacción del inducido  $\Phi_{ct}$ . Debido a que el eje de cuadratura también se encuentra a  $90^\circ$  del eje directo, el fasor de voltaje generado  $G_{ch}$  recae sobre el eje de cuadratura. Este hecho es clave en el análisis de las máquinas síncronas de polos salientes, ya que al ser localizado el voltaje generado  $G_{ch}$  localizan de manera automática el eje directo y el eje de cuadratura [3]. Del lado derecho de la Figura 8, se observan las ondas de la densidad de flujo ubicadas en la superficie del inducido, produciendo la corriente de campo y el componente fundamental espacial de rotación síncrono de la fuerza magnetomotriz de reacción del inducido.

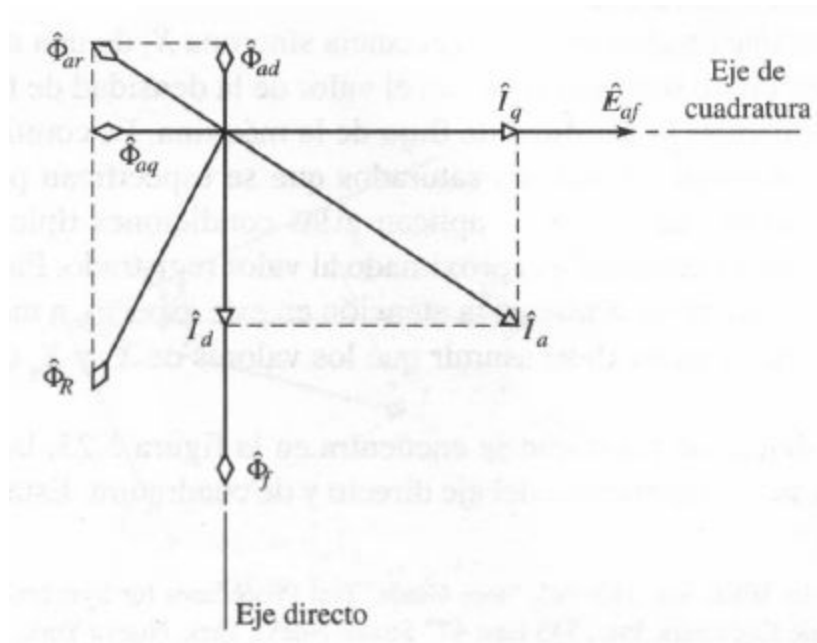
Por su parte, la Figura 9 muestra el flujo del entrehierro del eje de cuadratura. Ya que el entrehierro presenta mayor longitud entre los polos y la mayor reluctancia, el flujo de reacción del inducido fundamental espacial al estar a lo largo del eje de cuadratura es menor que el flujo de reacción al estar a lo largo del eje directo.



**Figura 9:** Flujo del entrehierro de los ejes de cuadratura en una máquina síncrona de polos salientes [3].

Por tanto, la reactancia de magnetización del eje de cuadratura es menor que la que presenta el eje directo.

Valiéndose de las corrientes y voltajes definidos en las Figuras 8 y 9, es posible ahora realizar el diagrama fasorial para la máquina síncrona de polos salientes, el cual se presenta en la Figura 10:

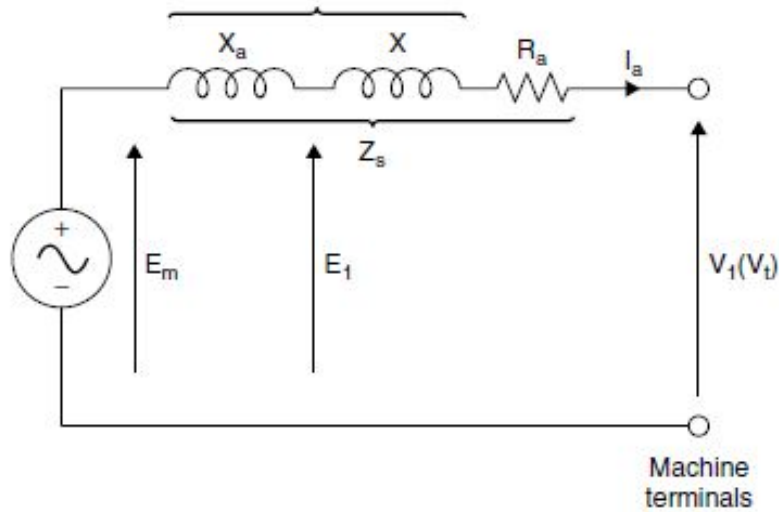


**Figura 10:** Diagrama fasorial de un generador de polos salientes [3].

En la Figura 10 se puede observar que la corriente  $K_c$  es la corriente del inducido, mientras que las corrientes  $K_f$  e  $K_s$  son las corrientes asociadas al eje directo y al eje de cuadratura respectivamente. El componente  $K_f$  del eje directo produce un componente del flujo de reacción del inducido fundamental espacial  $\phi_{cf}$  a lo largo del eje directo, mientras que el componente  $K_s$  produce un componente del flujo de reacción del inducido fundamental espacial  $\phi_{cs}$  a lo largo del eje de cuadratura [3].

## 1.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA.

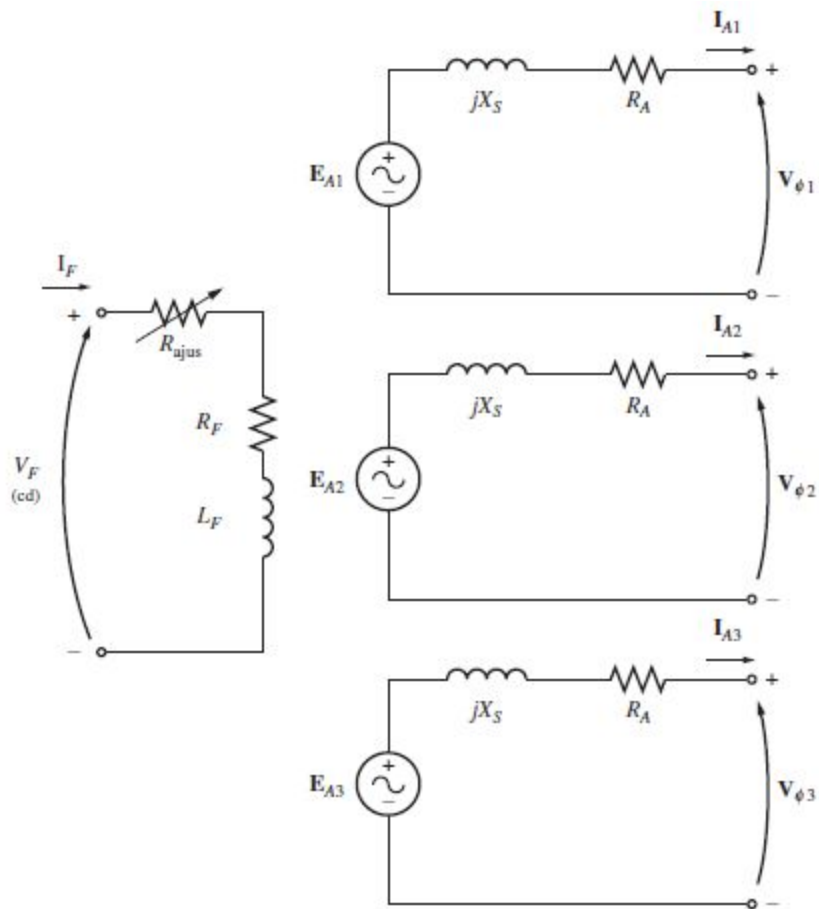
Debido a que en un circuito trifásico todas las corrientes y los voltajes son simétricos, los ingenieros trabajan con la representación de una sola línea. Las características básicas de funcionamiento de una máquina síncrona pueden ser obtenidas mediante el circuito equivalente en estado estable mostrado en la Figura 11:



**Figura 11:** Circuito equivalente en estado estable de una máquina síncrona [5].

En la Figura 11,  $Z$  es la reactancia de fuga, mientras que  $Z_c$  es la reactancia de reacción de armadura,  $T_c$  es la resistencia de armadura y  $\backslash_u$  es la impedancia de toda la máquina síncrona.  $G_o$  es el voltaje de magnetización.

La Figura 12 muestra el circuito equivalente completo de un generador síncrono trifásico. En dicha figura, una fuente de potencia de cd suministra potencia al circuito de campo del rotor, el cual se modela por medio de la inductancia y la resistencia en serie de la bobina. Una resistencia ajustable  $T_{clwu}$  controla el flujo de corriente de campo [1].



**Figura 12:** Circuito equivalente completo de un generador sincrónico trifásico [1].

El lado derecho de la Figura 12 muestra los modelos de cada fase, cada una de las cuales tienen un voltaje interno generado con su respectiva inductancia en serie  $Z_u$  y una resistencia en serie  $T_C$ . Las corrientes y voltajes de cada rama están desfasadas  $90^\circ$ .

”

## **1.5 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA.**

Para realizar el estudio de la máquina síncrona y conocer su comportamiento bajo diversas condiciones de operación, es necesario contar con el modelo matemático de la misma el cual se desarrolla en función de sus parámetros tales como las reactancias del eje directo y del eje de cuadratura en el caso de la máquina de polos salientes, la constante de inercia, el factor de amortiguamiento [11].

Cuando estos parámetros son desconocidos se debe recurrir a metodologías reconocidas por estar avaladas por institutos que poseen gran reconocimiento en la comunidad científica, tal como las normas estándar 115 IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) para la determinación de los parámetros de las máquinas síncronas.

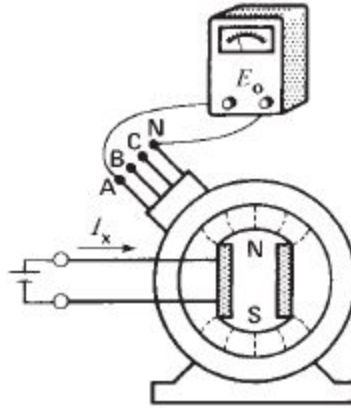
Estos métodos, como la prueba al vacío, la prueba de factor de potencia cero, el ensayo de respuesta en frecuencia, se realizan bajo condiciones de operación estática, por lo que sus resultados son relativos ya que pueden cambiar cuando suceden cambios en el punto de operación de la máquina cuando está en servicio. Otra desventaja de la mayoría de estos métodos es que para su aplicación, evidentemente se debe interrumpir el servicio que presta la máquina.

La Guía de la IEEE consta de instrucciones para dirigir las pruebas más generales y prácticas para determinar las características de desempeño de las máquinas síncronas [12].

### **1.5.1 ENSAYO DE SATURACIÓN EN VACÍO.**

La Figura 13 muestra un generador síncrono de dos polos operando sin carga, impulsado por velocidad constante [13]. Los conductores del estator trifásico se

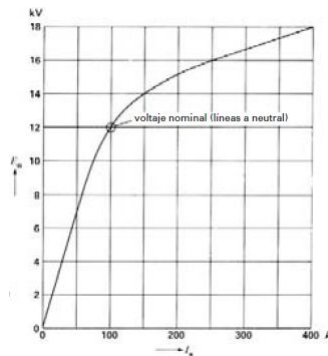
conectan a los terminales A, B, C y N, mientras que una corriente de excitación variable  $I_x$  produce el flujo en el entrehierro:



**Figura 13:** Generador síncrono de dos polos operando sin carga [13].

Se incrementa gradualmente la corriente de excitación mientras se observa el voltaje de CA entre una de las terminales, por ejemplo la terminal A, y el neutro. Se puede observar que para bajos valores de la corriente de excitación  $I_x$  dicho voltaje se incrementa en proporción directa con la corriente.

Sin embargo, para valores mayores de  $I_x$ , el voltaje se eleva con menor pendiente porque el entrehierro comienza a saturarse. De esta manera se obtiene la curva de saturación sin carga del generador síncrono, que se ilustra en la Figura 14:



**Figura 14:** Curva de saturación sin carga para generador trifásico de 36 MVA, 21 KV [13].

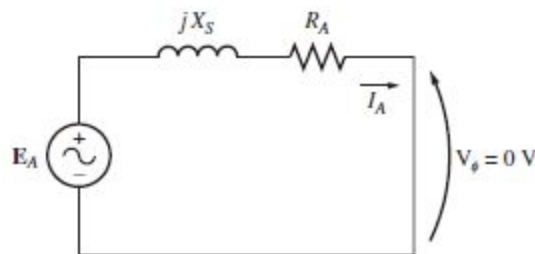


La prueba de saturación en vacío presenta algunas ventajas entre las cuales se encuentran [12]:

- Facilidad de implementación;
- No ocasiona daños al sistema debido a una energización inicial segura para el generador.

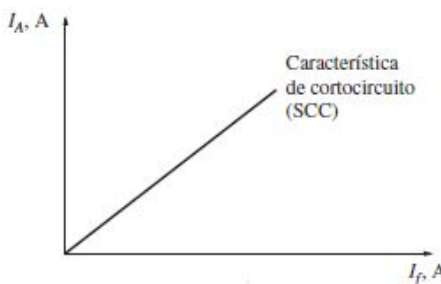
### 1.5.2 ENSAYO DE CORTOCIRCUITO.

Para esta prueba se iguala a cero la corriente de campo y se hace cortocircuito en las terminales del generador por medio de un conjunto de amperímetros [1]. La Figura 15 muestra el circuito equivalente de un generador sincrónico durante la prueba del cortocircuito:



**Figura 15:** Circuito equivalente de un generador sincrónico durante la prueba del cortocircuito [1].

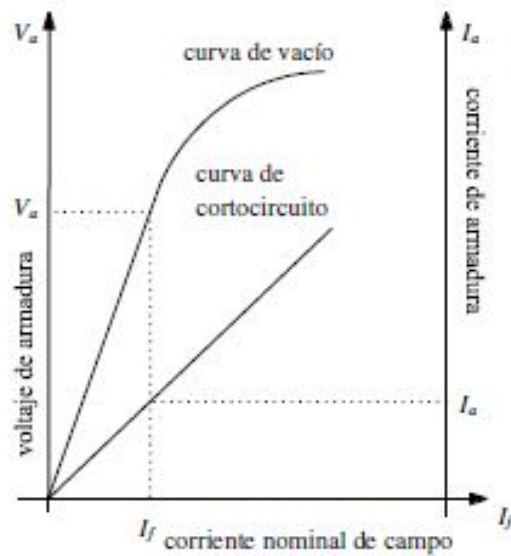
Se procede a medir la corriente en el inducido  $K_C$  o la corriente de línea  $K_N$  mientras se incrementa la corriente de campo. La Figura 16 muestra la forma de la curva (una recta) obtenida para esta prueba.



**Figura 16:** Característica de cortocircuito de un generador sincrónico [1].

Con los ensayos de saturación en vacío y la prueba de cortocircuito es posible obtener la reactancia sincrónica saturada de eje directo  $Z_{if}$  y la reactancia sincrónica no saturada de eje directo  $Z_f$  mediante las siguientes ecuaciones [11].

Para la reactancia sincrónica saturada de eje directo  $Z_{if}$  se toma el voltaje nominal  $X_c$  de armadura de la curva característica de vacío para una corriente de campo  $K_f$  y la corriente de armadura  $K_c$  de la curva característica de cortocircuito para la misma corriente de campo  $K_f$ , según se procede en la Figura 17:



**Figura 17:** Curva característica de vacío y cortocircuito [11].

La reactancia sincrónica saturada de eje directo  $Z_{if}$  se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Z_{if} = \frac{X_c}{K_c} \quad (1)$$

$X_c$  <"Voltaje nominal de armadura de la curva característica de vacío

$K_c$  <"Corriente de armadura de la curva característica de cortocircuito

Por su parte, para la reactancia sincrónica no saturada de eje directo  $Z_f$  se parte de la característica de saturación en el vacío y de la característica en cortocircuito, tomando el valor de la corriente de campo  $K_{HUK}$  correspondiente a la corriente nominal de armadura  $K_\xi$  de la curva de cortocircuito y la corriente de campo  $K_{HI}$  correspondiente al voltaje nominal  $X_c$  de la curva de vacío.

De esta manera  $Z_f$  se obtiene mediante la siguiente fórmula:

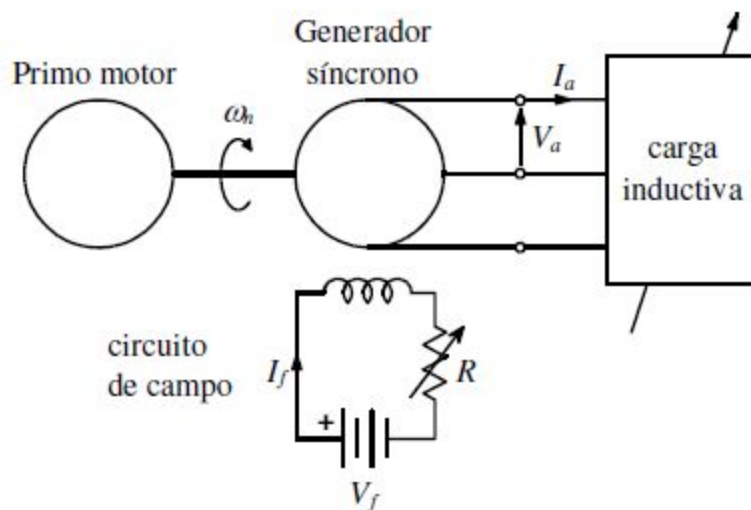
$$Z_f = \frac{K_{HUK}}{K_{HI}} \quad (2)$$

$K_{HI}$  <"Corriente de campo correspondiente al voltaje nominal  $X_c$  de la curva de vacío

$K_{HUK}$  <"Corriente de campo correspondiente a la corriente nominal de armadura  $K_\xi$  de la curva de cortocircuito.

### 1.5.3 PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA CERO.

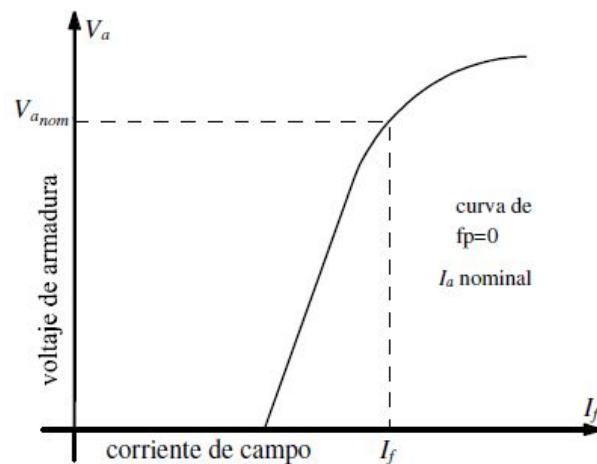
Operando la máquina como generador, se alimenta una carga inductiva variable a corriente de armadura nominal  $K_\xi$  a una velocidad sincrónica de giro  $\omega_o$  [11]. La Figura 18 ilustra la conexión apropiada para la realización de esta prueba:



**Figura 18:** Conexión para el ensayo de factor de potencia cero [11].

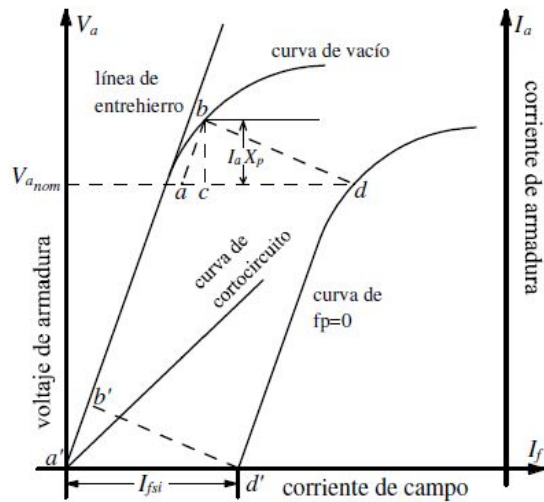
Se cortocircuitan los terminales de estator, para luego reemplazar el cortocircuito de los terminales de estator por una carga inductiva variable para conservar una diferencia de  $90^\circ$  de fase entre la corriente  $K_c$  y el voltaje  $X_c$ . Finalmente se realiza la medición de  $K_h$  variando el reóstato y manteniendo el valor de  $K_c$ .

Se obtiene entonces la curva característica de la prueba de factor de potencia cero para un generador sincrónico, tal como se muestra en la Figura 19:



**Figura 19:** Curva de factor de potencia cero para un generador sincrónico [11].

Se utiliza la curva de vacío, la curva de cortocircuito y la curva de factor de potencia cero para determinar la reactancia de Potier, procedimiento que hace uso de la interposición mostrada en la Figura 20:



**Figura 20:** Curvas de vacío, cortocircuito y factor de potencia [11].

El triángulo de Potier se corresponde con los puntos b-c-d de la Figura 20. Luego, mediante el cálculo de la distancia vertical entre los puntos b y c, tomando en cuenta la corriente de armadura nominal  $K_c$ , se obtiene la reactancia de Potier  $Z_r$ , de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Z_r = \frac{\|de\|}{K_c} \quad (3)$$

$de$  < Distancia vertical entre los puntos b y c;

$K_c$  < Corriente de armadura nominal

#### 1.5.4 ENSAYO BAJO CARGA.

El comportamiento de un generador sincrónico depende en gran parte del tipo de carga que se incorpora al circuito de alimentación [13]. A pesar de su gran variedad, todas las cargas se pueden agrupar en dos tipos de categorías:

- Cargas aisladas alimentadas por un solo generador;
- El bus infinito o barra conductora infinita.

Si se considera el primer caso, cargas aisladas, esta prueba representa una alternativa para determinar la reactancia del eje en cuadratura  $Z_s$  de la máquina sincrónica.

Las variables necesarias de medir son las siguientes: corriente de armadura  $K_c$ , voltaje de armadura  $X_c$ , ángulo de factor de potencia  $\phi$  y ángulo de par  $\delta$ .

Luego, para hallar la reactancia del eje en cuadratura  $Z_s$  se aplica la siguiente fórmula:

$$Z_s = \frac{X_c \cos \phi}{\sin \delta} \quad (4)$$

### 1.5.5 ENSAYO DE RESPUESTA EN FRECUENCIA.

Los datos que se obtienen del ensayo de respuesta en frecuencia describen la respuesta de flujo de la máquina sincrónica a la corriente de estator y cambios en los voltajes de campo tanto en el eje directo como en el eje de cuadratura [14]. Actualmente las máquinas sincrónicas son modeladas haciendo uso de circuitos equivalentes que se basan en estos dos ejes.

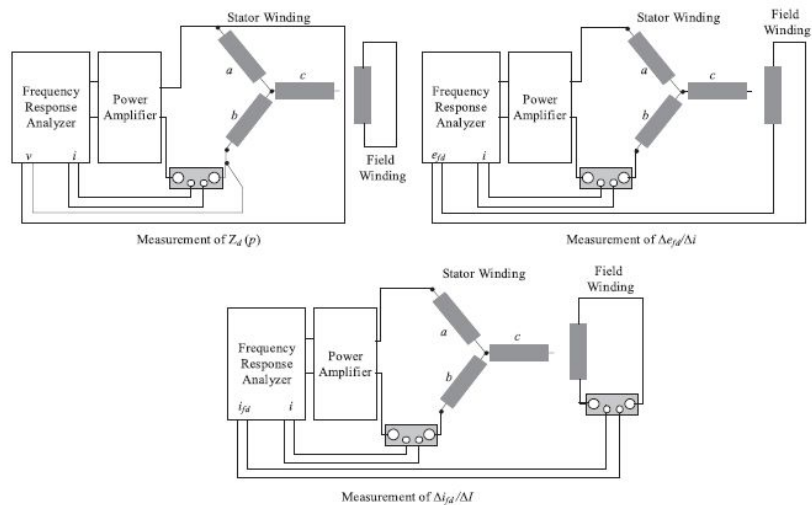
Entre las ventajas de este método están las siguientes:

- Se puede aplicar *in situ*, mientras la máquina está operando en la fábrica;
- La máquina estudiada corre poco riesgo;
- Ofrece datos sobre la actividad tanto del eje directo como del eje de cuadratura.

El análisis de la respuesta en frecuencia de la máquina sincrónica ofrece datos sobre la impedancia operacional del eje directo  $Z_d$  y del eje de cuadratura  $Z_q$ , así como la función de transferencia de la máquina, mediante la descripción de las relaciones

entre los voltajes y corrientes en función de la frecuencia. También se determinan las constantes de tiempo transitoria y sub transitoria de la máquina.

El procedimiento, tal como es descrito en la Guía 115 IEEE, se muestra en la Figura 21, donde el rotor es colocado para posicionar el rotor con el eje directo. Lo mismo se realiza luego con el eje de cuadratura.



**Figura 21:** Configuración para el ensayo de respuesta en frecuencia para el eje directo de la máquina síncrona, de acuerdo al IEEE standard 115 A [14].

Se miden el voltaje y la corriente de armadura ( $X_c \cdot K_e$ ), el voltaje y la corriente de campo ( $g_{lf} \cdot k_{lf}$ ), de eje directo ( $\hat{e}_{g_f} \cdot \hat{e}_{k_f}$ ) y de eje de cuadratura ( $\hat{e}_{g_s} \cdot \hat{e}_{k_s}$ ). La magnitud de las impedancias operacionales  $\lambda_f$  y  $\lambda_s$  se miden para un rango determinado de frecuencias, aplicando las siguientes fórmulas:

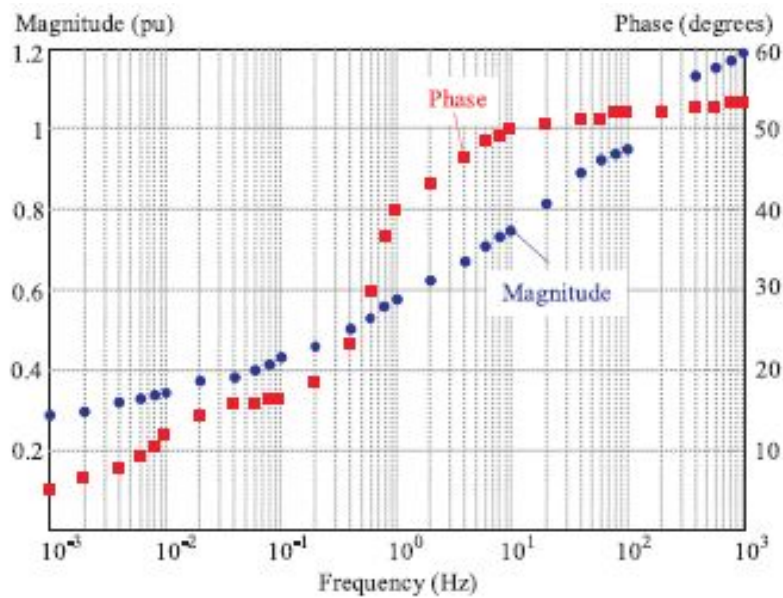
$$\lambda_f \cdot \omega \approx \frac{\hat{e}_{g_f} \cdot \omega}{\hat{e}_{k_f} \cdot \omega} \approx rctc \cdot \hat{e}_{g_{lf}} \cdot 2 \quad (5)$$

$$\lambda_s \cdot \omega \approx \frac{\hat{e}_{g_s} \cdot \omega}{\hat{e}_{k_s} \cdot \omega} \quad (6)$$

Mientras que la ganancia de voltaje  $I$  se evalúa mediante:

$$I \cdot \omega \approx \frac{\hat{e}_{g_f} \cdot \omega}{U \hat{e}_{g_{lf}} \cdot \omega} \approx rctc \cdot \hat{e}_{k_f} \cdot 2 \quad (7)$$

La Figura 22 muestra el resultado de analizar  $\backslash_f$  mediante simulación computarizada, para un rango de frecuencia de operación de la máquina que va desde mili Hertz a kilo Hertz:



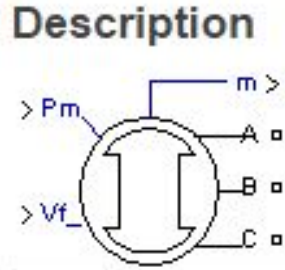
**Figura 22:** Determinación de magnitud y fase de la impedancia operacional del eje directo  $\backslash_f$  mediante ensayo de respuesta en frecuencia [14]

## 1.6 SIMULACIÓN DE UNA MÁQUINA SINCRÓNICA CON MATLAB.

Es bien conocido que un modelo matemático para las máquinas sincrónicas puede estar compuesto por ecuaciones diferenciales de primer, segundo, tercer y hasta séptimo orden. Evidentemente, las representaciones con ecuaciones de séptimo orden son las más complejas, pero describen el comportamiento de las máquinas sincrónicas de una manera más exacta [15]. Para facilitar el análisis de las máquinas sincrónicas mediante simulación computarizada, Matlab ofrece una librería en su sección *SimPowerSystems*, que ofrece distintos modelos de máquinas no sólo sincrónicas sino asincrónicas, motores DC y transformadores. La librería de

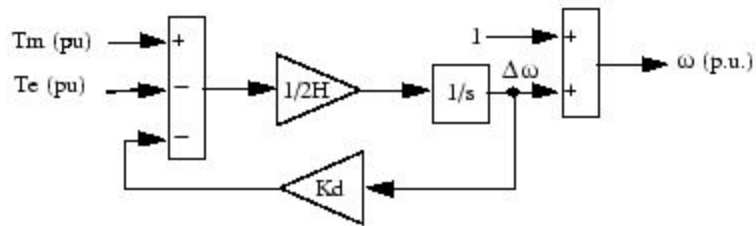


*SimPowerSystems* permite modelar máquinas sincrónicas de polos salientes o de rotor cilíndrico, cuyo bloque general está ilustrado en la Figura 23:



**Figura 23:** Bloque fundamental de una máquina sincrónica en Matlab/Simulink [16].

El bloque de la Figura 22 puede operar como generador o como motor. El modelo está basado en una representación matemática de ecuaciones de estado de sexto orden, que incluye un sistema mecánico y un sistema eléctrico. Mediante el diagrama de bloques de la Figura 24 se ilustra la parte mecánica:



**Figura 24:** Diagrama de bloques del sistema mecánico de una máquina sincrónica en Matlab/Simulink [16].

$\hat{\omega}$  < Variación de velocidad angular respecto a la velocidad de operación;

$J$  < Constante de inercia;

$T_o$  < Torque mecánico;

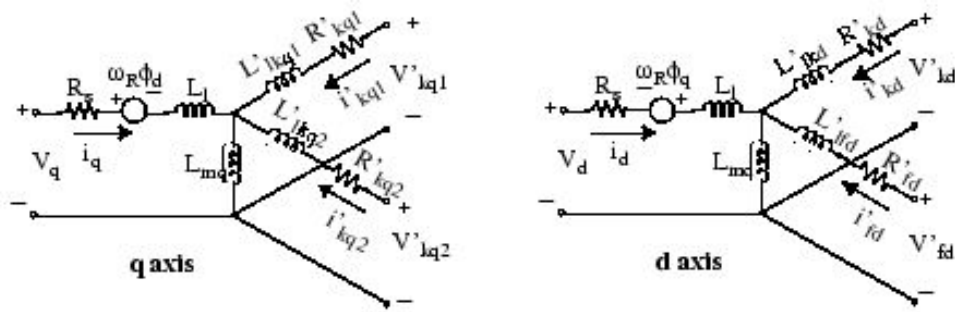
$T_g$  < Torque electromecánico;

$M_f$  < Factor de amortiguamiento;

$\omega_m$  < Velocidad mecánica el rotor en función del tiempo

$\omega_2$  < Velocidad de operación.

Mientras, el sistema eléctrico implícito en modelo de la Figura 23 es señalado en la Figura 25, e inmediatamente se especifican los parámetros solicitados por el modelo:



**Figura 25:** Diagrama del sistema eléctrico de máquina síncrona en Matlab/Simulink [16].

Los parámetros de estator solicitados por el modelo son:

$T_u$  < Resistencia de estator por fase;

$N_n$  < Inductancia de estator;

$N_{of}$  < Inductancia de magnetización del eje directo vista desde el estator;

$N_{os}$  < Inductancia de magnetización del eje de cuadratura vista desde el estator.

Los parámetros de campo solicitados por el modelo son:

$T_h$  < Resistencia de campo;

$N_h$  < Inductancia de campo.

Otros parámetros solicitados son:

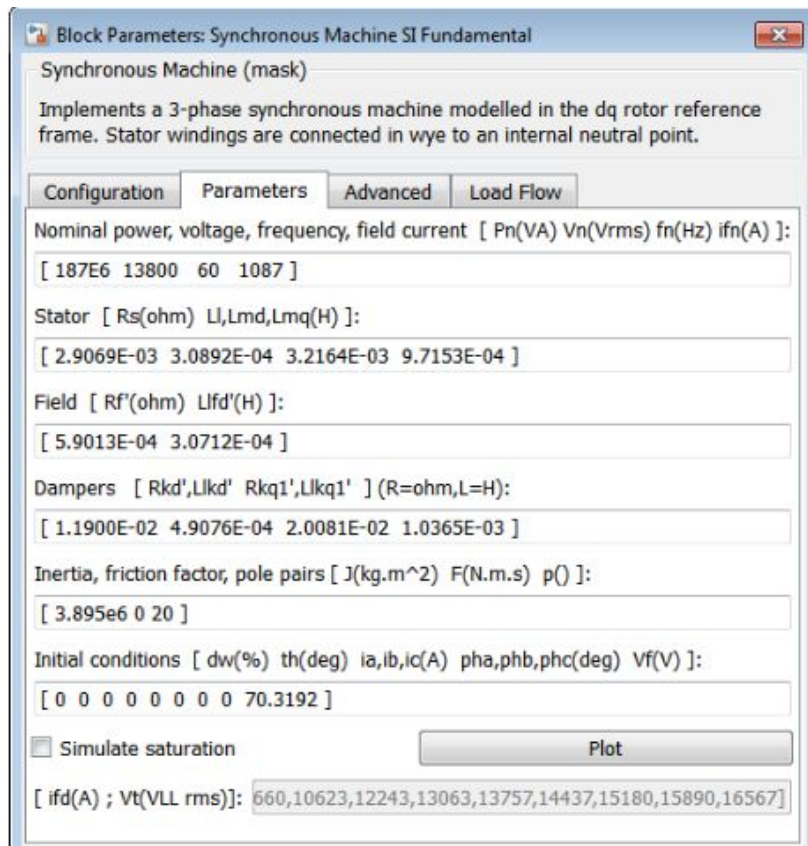
$R_p$  < Potencia nominal;

$X_p$  < Voltaje nominal;

$H_p$  < Frecuencia nominal;

$K_{fp}$  < Corriente de campo nominal.

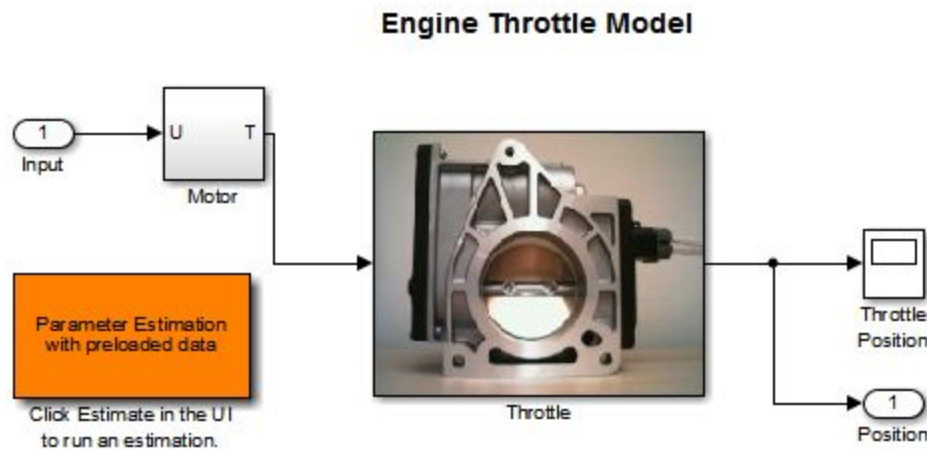
Los parámetros pueden ser configurados en la caja de diálogo (*Dialog Box*) cuyo ejemplo se ofrece en la Figura 26 con unidades del Sistema Internacional (SI), provisto por el sistema cuando se está diseñando en Simulink:



**Figura 26:** Ventana de diálogo para configurar los parámetros de la máquina sincrónica en Matlab/Simulink [16]

### 1.6.1 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS.

Para ilustrar el método de estimación de parámetros en Matlab/Simulink para una máquina síncrona, se presenta el ejemplo de la Figura 27:



**Figura 27:** Ejemplo de máquina síncrona. Modelo de acelerador de motor [16].

En la Figura 27 se puede observar un acelerador que cumple con la función de controlar el flujo de masa de aire en el colector de admisión de un motor. El cuerpo del acelerador está provisto de una válvula mariposa que se abre cuando la persona que conduce el auto, pisa el pedal del acelerador. Esto permite la entrada de más aire a los cilindros del motor, y por tanto, el motor mismo produce más par. Un motor de corriente controla el ángulo de apertura de la válvula mariposa. También se instala un resorte unido a la válvula para devolverla a su posición inicial cuando se desactiva el motor que controla el ángulo de apertura de la válvula. La rotación de la válvula está limitada a aproximadamente 90 grados. Por lo tanto, si una entrada de mando grande se aplica al motor, la válvula golpea unos topes duros que impiden que gire más.

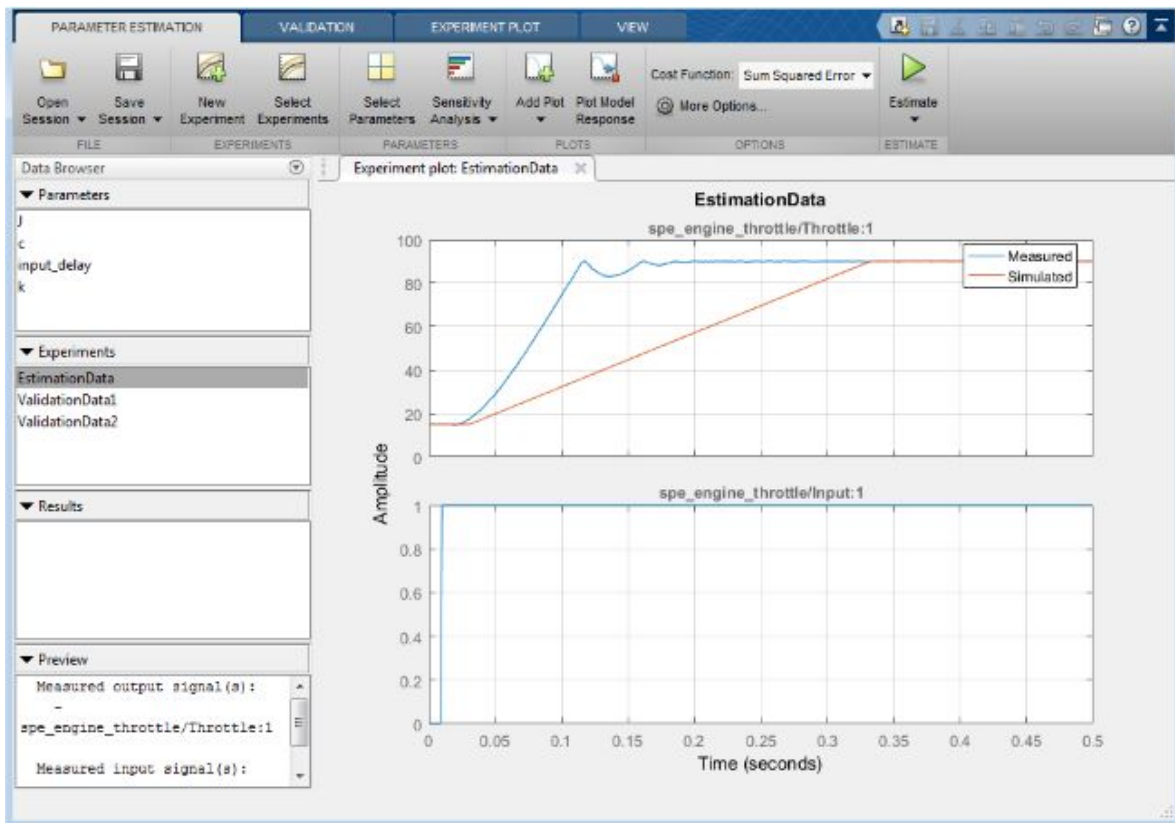
El motor se modela como una ganancia de par y una entrada de retardo de tiempo con los parámetros de  $M_v$  (ganancia de torque) y  $k_{pr} \omega_{af} g_{rc}$  (entrada de retardo de

tiempo de respuesta del motor). La válvula de mariposa es modelada como un sistema masa-resorte-amortiguador con los parámetros  $L$  (constante de inercia de la válvula mariposa),  $E$  (coeficiente de amortiguamiento) y  $M$  (constante del resorte). Los valores de los parámetros del sistema no se conocen con precisión.

Para realizar una estimación de los parámetros de la simulación a partir de datos medidos y cargados previamente, se hace doble clic en el cuadro anaranjado de la Figura 27 titulado “*Parameter Estimation GUI with Preloaded Data*”. Esta aplicación ejecuta tres experimentos:

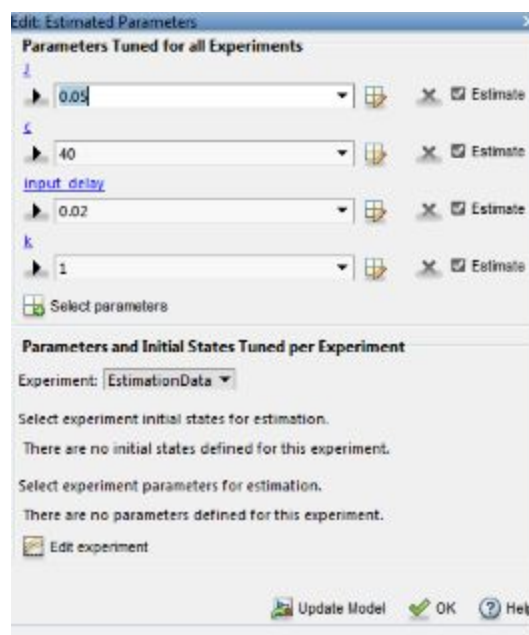
- “EstimationData”, para la estimación de los parámetros;
- “ValidationData1 y ValidationData2”, para validar los datos estimados.

El programa ofrece la ventana de diálogo que se ilustra en la Figura 28:



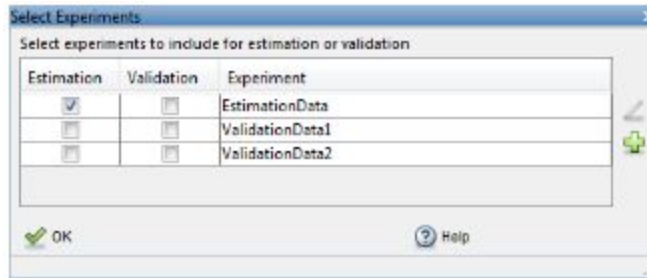
**Figura 28:** Ventana de diálogo para la aplicación Estimación de Parámetros [16].

La simulación representada en la Figura 28 muestra que el modelo (línea roja) no coincide con los datos medidos (línea azul) y que debe realizarse una estimación de los parámetros. Para ello, en el menú de la aplicación se hace clic sobre el ícono “Select Parameters”, el cual conduce a la ventana de diálogo de la Figura 29. En esta ventana se seleccionan los parámetros a ser estimados, los cuáles son  $M$ ,  $L$ ,  $E$ ,  $M$  y  $k$  según el ejemplo:



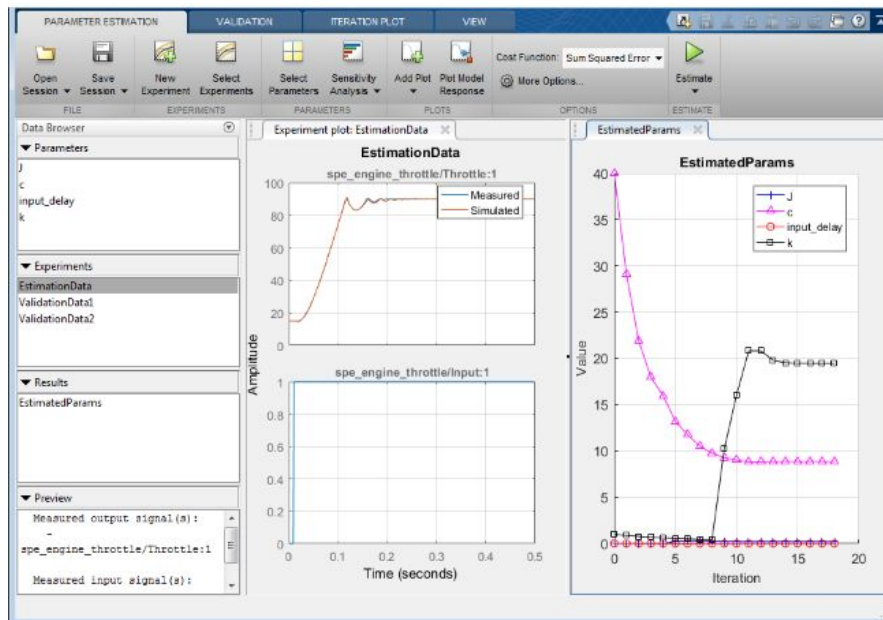
**Figura 29:** Ventana de diálogo para selección de parámetros a ser estimados [16]. .

Con los parámetros seleccionados en el proceso anterior, se procede a seleccionar el tipo de experimento, en este caso, la estimación de los parámetros seleccionados, tal como se muestra en la Figura 30:



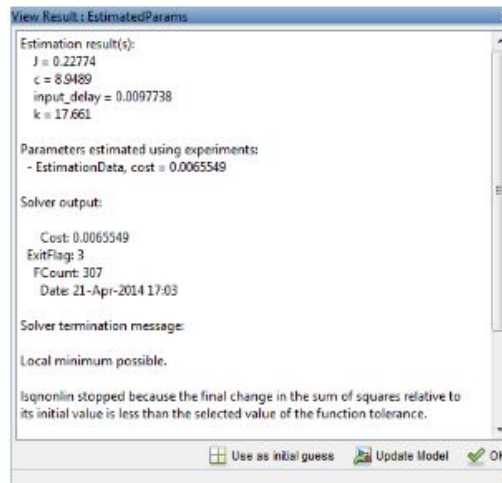
**Figura 30:** Ventana de diálogo para seleccionar el experimento [16].

Mientras que la estimación progresa, se abre una nueva ventana de diálogo. El proceso finaliza con una estimación que se aproxima bastante a los datos medidos, tal como se muestra en la Figura 31:



**Figura 31:** Ventana de diálogo para Estimación de Parámetros. El modelo coincide con los datos medidos [16].

Al observar que ahora el modelo coincide con los datos medidos, se verifica que los valores de los parámetros son los adecuados para la simulación. Estos valores obtenidos para el ejemplo en estudio son presentados en la Figura 32:

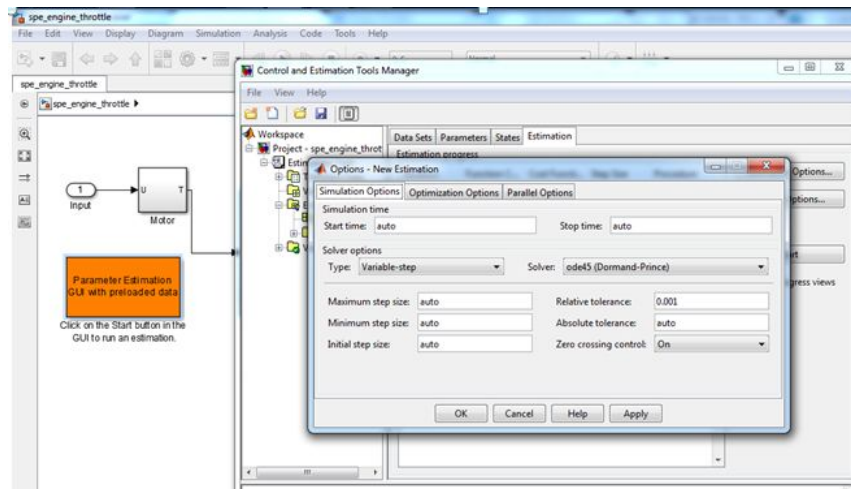


**Figura 32:** Ventana de diálogo para Estimación de Parámetros. El modelo coincide con los datos medidos [16].

## 1.6.2 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN DE ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

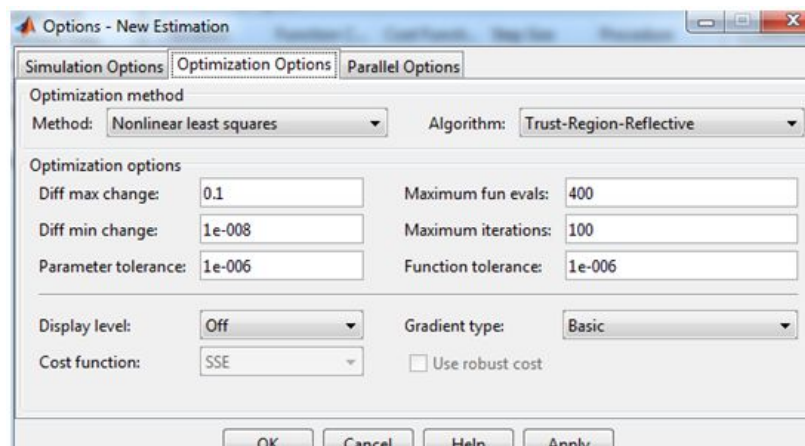
Existen varios métodos que pueden ser utilizados para acelerar y optimizar el proceso de estimación de los parámetros. Entre ellos se encuentra el método de Mínimos Cuadrados No Lineales, que se usa particularmente cuando el modelo contiene muchos parámetros por estimar. Para seleccionar este método, se utiliza nuevamente el ejemplo de la Figura 27. Dando clic al cuadro anaranjado, se accede a la ventana de herramientas de estimación “*Control and Estimation Tools Manager*”, y de allí a la ventana “*Estimation Options*”, tal como se muestra en la Figura 33:





**Figura 33:** Ventana de “Estimation Options” en Matlab/Simulink [16].

Haciendo clic en “Optimization Options”, se accede a la ventana de la Figura 34:



**Figura 34:** Ventana de “Optimization Options” en Matlab/Simulink [16]

Se puede observar el ícono donde se puede seleccionar el método de Mínimos Cuadrados No Lineales.

Existen al menos cinco algoritmos de mínimos cuadrados, que se enlistan a continuación:

- Trust-region-reflective;
- Levenberg-Marquardt;

- Lsqlin active-set;
- Lsqlin interior-point;
- Lsqnonneg.

El método de minimización (*Constrained Minimization*) consiste en resolver el problema de encontrar un vector  $Z$  que es un mínimo local para una función escalar  $h_{z^*+}$ , sujeto a la siguiente restricción:

$$o \quad k p_z h_{z^*+} \quad (8)$$

Tal que una o algunas de las siguientes relaciones se mantengan:

$$E_{z^*+} \ddot{O} \quad (9)$$

$$E_{gs} z^*+ ? 2$$

$$C_z \ddot{O} d "$$

$$C_{gs} z^*+ ? d_{gs} "$$

$$n \ddot{O} z \ddot{O} w "$$

## Bibliografía

- [1] S. Chapman, Máquinas Eléctricas - 5ta. Edición, México: McGraw Hill, 2012.
- [2] J. Aller, «Máquinas Eléctricas Rotativas: Inducción a la Teoría General.,» Equinoccio. Universidad Simón Bolívar, Caracas, 2008.
- [3] A. Fitzgerald y C. Kingsley, Máquinas Eléctricas - 6ta. Edición, México: MaGraw Hill, 2004.
- [4] A. Barakat, S. Tnani, G. Champenois y E. Mouni, «Analysis of Synchronous Machine modeling for simulation and industrial applications.,» Universidad de Poitiers, Poitiers, 2010.
- [5] G. Klemptner y I. Kerszenbaum, Principles of Operation of Synchronous Machines, in Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance, Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- [6] J. Grainger y W. Stevenson, Análisis de Sistemas de Potencia, México: MaGraw Hill, 1996.
- [7] T.-F. Chan, «Synchronous Machine,» *Electrical Engineering*, vol. 3, 2007.
- [8] ABB, «Synchronous Motors. High Performance in all applications.,» ABB - Motors&Generators, 2011.
- [9] WEG, «Motores Sincrónicos,» Grupo WEG - Unidad Energía, Jaraguá do Sul, 2015.
- [10] Wikispaces, «Wikispace,» 2012. [En línea]. Available: <https://referencias111.wikispaces.com/file/view/Capitulo3.pdf>.
- [11] A. Perez y Y. Romero, «Medición indirecta de algunos parámetros de la máquina sincrónica a partir de la medida del ángulo del par.,» Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2007.
- [12] IEEE, «IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines. (IEEE Std 115),» New York, 2009.
- [13] T. Wildi, Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia - 6ta. Edición, México: Pearson Educación, 2007.

- [14] M. Hasni, O. Touhami, R. Ibtouen, M. Fadel y S. Caux, «Synchronous Machine Parameter Estimation by StandStill Frequency Response Tests.,» *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, vol. 59, nº 2, p. pp. 75–80, 2008.
- [15] Z. Spoljaric, K. Miklosevic y V. Jerkovic, «Synchronous Generator Modeling Using Matlab.,» University de Osijek, Osijek, 2012.
- [16] MATLAB, «MATLAB,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com>.

Larry Francis Obando – TSU

Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Escuela de Ingeniería Electrónica de la Universidad Simón Bolívar, Valle de Sartenejas.

Escuela de Turismo de la Universidad Simón Bolívar, Núcleo Litoral.

Contact:

WhatsApp: 00593984950376

email: [dademuchconnection@gmail.com](mailto:dademuchconnection@gmail.com)

Copywriting, Content Marketing, Tesis, Monografías, Paper Académicos, White Papers (Español - Inglés)