

Generador Síncrono

(Modalidad Presencial)



Fig. 1 Generador Síncrono trifásico

1. OBJETIVOS A LOGRAR:

- Medir parámetros eléctricos del generador.
- Realizar ensayos de vacío y cortocircuito considerando condiciones nominales.
- Calcular el circuito equivalente del generador síncrono a partir de la medición de resistencia y los ensayos de vacío y cortocircuito.
- Realizar el ensayo regulación, de características exteriores y de carga del generador con diversos tipos y valores de carga eléctrica.
- Realizar las curvas características del generador con los datos obtenidos.
- Analizar y evaluar las curvas experimentales y curvas generadas matemáticamente con el circuito eléctrico equivalente.
- Encontrar soluciones a problemas referidos al generador síncrono analizando la información obtenida en los ensayos.

2. FUNDAMENTO TEORICO:

Los generadores síncronos o alternadores se usan para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de CA. El funcionamiento de los generadores síncronos se basa en la **ecuación de Faraday** en la cual hacer girar una espira dentro de un campo magnético para que se induzca en aquella una fuerza electromotriz. También sucede lo mismo si se deja la espira fija y se hace girar el campo.

$$E_g = K_g \cdot N \cdot \Phi$$

K_g Constante que depende de las características constructivas de la máquina.

N Velocidad de rotación del generador.

Φ Flujo magnético producido por el campo inductor.

Como se podrá ver en el caso de querer variar la tensión generada se tiene dos posibilidades, una es variar el flujo magnético y la otra es variar la velocidad (N) de giro del rotor, pero esto último produce una variación en la frecuencia de la tensión inducida que está dada por:

$$f = \frac{\#p \cdot N}{120}$$

f frecuencia de las tensiones inducidas.

$\#p$ Número de polos del generador.

N Velocidad de rotación del rotor del generador.

En el caso de los **ensayos en el simulador** se utilizará un dinamómetro a velocidad constante y de esta manera la frecuencia de las tensiones y corrientes producidas por el generador será fija.

El generador tiene un circuito de corriente continua que alimenta los electroimanes inductores con la llamada “corriente de excitación” y se tiene un reóstato para poder variar dicha corriente de excitación del generador.

Partes del generador síncrono.

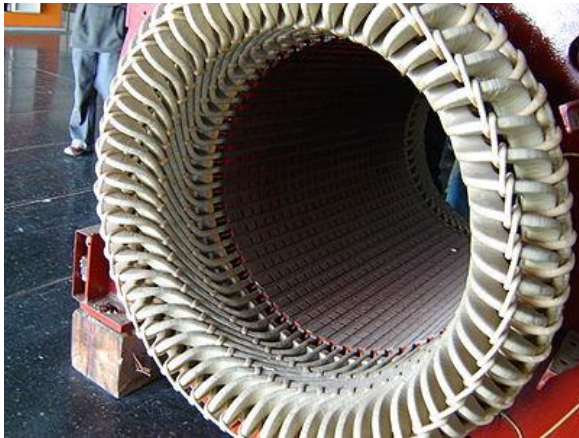


Fig. 2 Estator y rotor de polos salientes de un Generador Síncrono trifásico de campo giratorio



Fig. 3 Estator y rotor cilíndrico o liso de un Generador Síncrono trifásico de armadura giratoria

La armadura

Está compuesta por un núcleo de chapas de material ferromagnético, sujetas formando un paquete, mediante una serie de pernos o de chavetas en forma de cola de milano. Las chapas están aisladas entre sí, para evitar las pérdidas producidas por las corrientes parásitas. Como la mayor parte de los generadores son trifásicos, sus devanados también lo serán. Para diseñar un devanado se toma en cuenta el número de polos y el número de ranuras del estator o rotor dependiendo de la configuración.

Los devanados de la armadura se pueden realizar de dos formas: de devanado concentrado (se coloca un solo conductor o haz de conductores en una ranura por polo y por fase) y de devanado distribuido (los conductores se reparten en varias ranuras por polo y por fase).

Las **bobinas de armadura** se prefiere ubicarlas **en el estator** para minimizar las pérdidas cuando se trata de generadores de **gran potencia**. La forma del rotor se prefiere que sea del **tipo cilíndrico o liso** cuando se trata que el generador gire a **grandes velocidades** (menor número de polos por tener un diámetro del rotor menor), los generadores de **baja velocidad** tienen el rotor del *tipo de polos salientes* (mayor diámetro del rotor).

El campo

El inductor, se suele construir de una pieza para las máquinas de reducido número de polos o de núcleo central macizo, al que se fijan las masas polares en las máquinas multipolares. El número de polos está ligado a la velocidad del rotor. Por tanto, el número de polos resultará grande para los generadores movidos por turbinas hidráulicas o motores de combustión interna y pequeño para los accionados con turbinas de vapor.

En generadores de campo giratorio el mismo eje del rotor suele tener fijo el inducido de la excitatriz que suministra la corriente de excitación.

La carcasa

Es la parte externa de la máquina que envuelve al estator y comprende la cubierta, la base y los apoyos; en la cubierta se encuentran los conductos y orificios para la ventilación y en los apoyos se aseguran generalmente las **portas escobillas y los anillos deslizantes** que sirven para:

- **Aplicar corriente continua** a la excitación en el rotor (**campo giratorio**).
- **Extraer tensión alterna** del rotor de la armadura (**armadura giratoria**).

Los grupos electrógenos modernos hacen uso intensivo de los VAR (reguladores automáticos de voltaje) dispositivos electrónicos externos, los cuales son capaces de variar los parámetros de entrada con el propósito de compensar fluctuaciones a la salida. Una variación de carga trifásica producirá una variación de la frecuencia y tensión producida lo cual hace que se requiera controlar la velocidad del motor de combustión y la corriente de

excitación. La velocidad del motor de combustión se controla con el gobernador del motor regulando la variación del flujo de combustible, la tensión generada se regula con el VAR regulando la corriente de excitación al generador.

2.1. CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

El circuito equivalente constituye la herramienta más útil para estudiar el funcionamiento del generador síncrono.

El circuito equivalente permite el cálculo sistematizado de todos los valores que definen el funcionamiento del generador en cualquiera de las etapas de su operación.

El circuito equivalente por fase de un generador, es análogo a una fuente monofásica, con la diferencia que se tiene un control de la tensión generada por medio de la corriente de excitación y de la frecuencia por medio de la velocidad del motor primo que entrega la potencia mecánica, con lo que el circuito es como se indica en la Fig. 4.

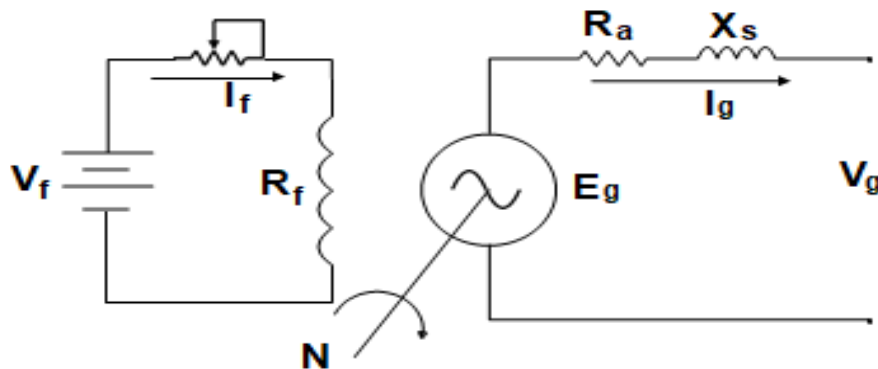


Fig. 4 Circuito equivalente de un motor asíncrono trifásico de jaula de ardilla

En este circuito:

- R_a : Resistencia de armadura.
- X_s : Reactancia síncrona.
- R_f : Resistencia de la bobina de excitación.
- I_g : Corriente de armadura.
- I_f : Corriente de excitación o de campo.
- E_g : Fuerza electromotriz inducida.
- V_g : Voltaje de carga.
- V_f : Voltaje del circuito de campo.
- N : Velocidad de giro del generador.

2.2. CÁLCULO DE LA REACTANCIA SINCRONA

Para la determinación de la reactancia síncrona se hace necesario realizar dos ensayos específicos, la curva de vacío y la curva de cortocircuito.

a) Características de Vacío:

Puesto que el circuito magnético en una máquina síncrona contiene materiales ferromagnéticos, la primera prueba es para determinar las características en vacío o de circuito abierto.

Para obtener las características de vacío, la maquina se hace girar sin carga a la velocidad de sincronismo por medio de un accionamiento primo.

b) Característica de Cortocircuito:

La prueba de cortocircuito se lleva a cabo cortocircuitando los tres terminales del bobinado de la armadura. Durante el ensayo se miden la corriente de armadura I_g y la corriente de excitación I_f , mientras que la velocidad del generador se mantiene prácticamente constante:

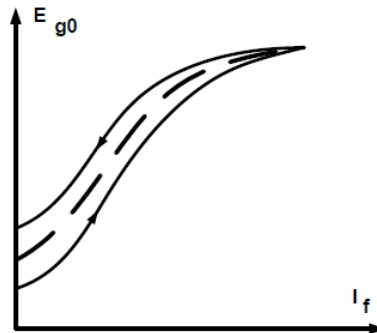


Fig. 5 Curva característica del circuito magnético

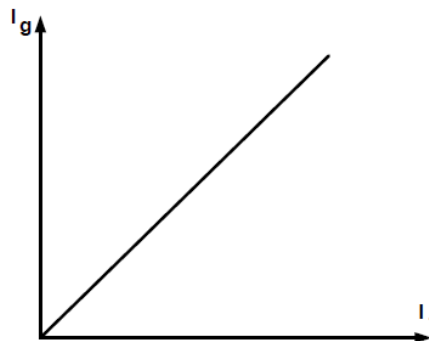


Fig. 6 Curva característica de cortocircuito.

Como se muestra en la figura siguiente, se procede a graficar las características de vacío y la llamada curva de aproximación del sistema. Luego se calcula gráficamente o numéricamente el valor de I_{fc} a partir de I_{gc} (corriente nominal del generador), con este valor se calcula en la gráfica del ensayo de cortocircuito el valor de V_{g0} , entonces el valor de la impedancia síncrona Z_s será:

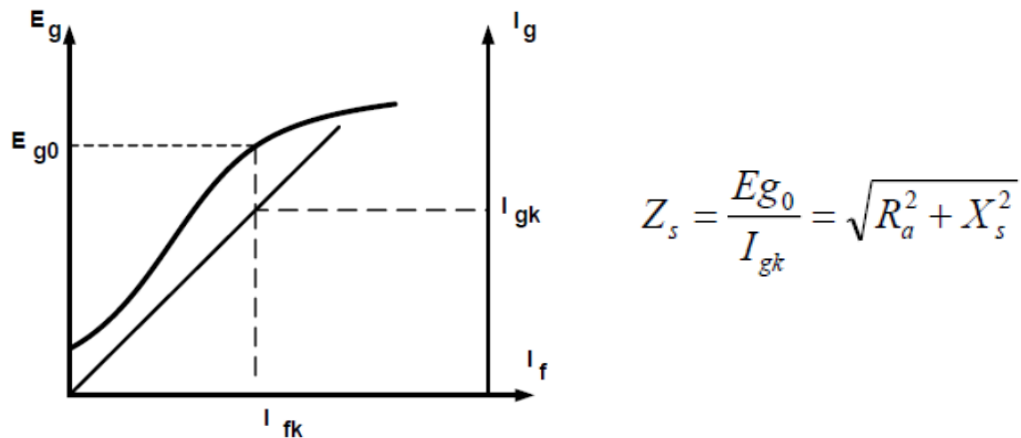


Fig. 7 Cálculo de la impedancia síncrona Z_s

2.3. Curvas Características

Puesto que los generadores síncronos funcionan con velocidad de rotación constante el grupo fundamental de curvas características que describen el comportamiento del generador al aplicársele carga son:

1. **Curva de Características con carga:** $V_g - I_f$ (para I_g y FP constantes)

En el caso particular cuando $I_g=0$, la curva de carga pasa a ser la curva de vacío, que es muy importante en la evaluación del generador.

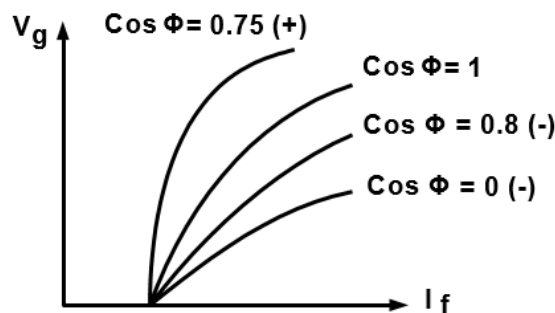


Fig. 8 Características con carga

2. **Curva de Características exteriores: $V_g - I_g$ (I_f y FP constantes)**

Cuando $I_g = 0$ todas a las características se cruzan en un mismo punto, que corresponde al valor de la corriente de corto circuito trifásico.

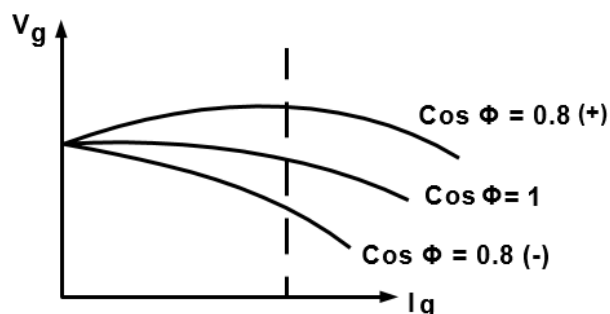


Fig. 9 Características exteriores

3. **Curva de Regulación: $I_g - I_f$ (V_g y FP constantes).**

En el caso particular cuando $V_g=0$ la curva de regulación pasa a ser la curva de cortocircuito.

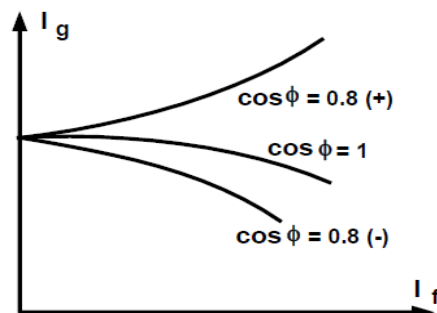


Fig. 10 Curvas de regulación

Efecto del tipo de Carga sobre la tensión de Salida

El efecto que tiene la aplicación de una carga sobre el generador síncrono es la aparición del efecto de reacción de armadura. La reacción de armadura es un campo magnético cuya magnitud y orientación depende del tipo de carga aplicado. Los diferentes comportamientos se pueden explicar por medio de fasores donde intervienen las siguientes variables:

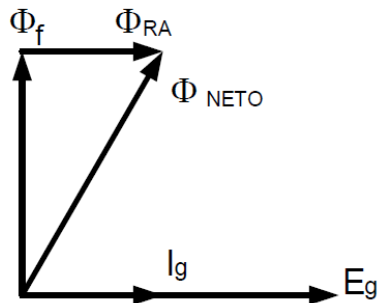


Fig. 11 Carga Resistiva

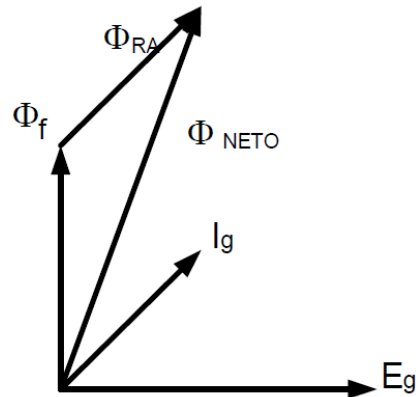
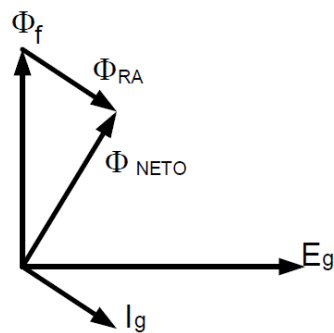


Fig. 12 Carga Capacitiva



Φ	:	Flujo de Armadura
Φ_{RA}	:	Flujo de reacción de armadura
Φ_{NETO}	:	Flujo neto
I_g	:	Corriente en la armadura
E_g	:	Fem inducida

Fig. 13 Carga Inductiva

Cabe resaltar el efecto que tiene la sumatoria fasorial de los flujos, sobre el voltaje a la salida, cuando se tiene una carga capacitiva, podemos ver que ésta tiende a crecer con el aumento de I_g , esto puede causar problemas en la red, como sobretensiones, si este efecto no se considera.

3. ACTIVIDADES A DESARROLLAR

- Verificar los datos de placa del generador a evaluar y determinar valores nominales para las pruebas a realizar.
- Realizar la medición de resistencias de armadura y campo, el ensayo de vacío y el ensayo de cortocircuito del generador.
- Realizar el cálculo del circuito equivalente.

- d. Realizar el ensayo de V_g vs I_f , características exteriores y regulación del generador síncrono.
- e. Analizar resultados y compararlos con los cálculos del circuito equivalente.
- f. Resolver las preguntas propuestas en función de los datos obtenidos en el laboratorio.

4. MATERIALES PARA LA REALIZACIÓN DEL LABORATORIO

- PC o Laptop con conexión a internet

4.1. LISTA DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS EN EL SOFTWARE

<i>Equipos e Instrumentos</i>	<i>Características</i>
Fuente de alimentación	Tensión constante 220 VDC, 16 A. Tensión variable 0-220 VDC. 16 A.
Vatímetros Yokogawa WT230	Entrada de Corriente máxima: 26A Precisión básica: 0.1 % Actualización de datos de alta velocidad 10 lecturas por segundo
Multímetro Fluke 189	Entrada de Corriente máxima: 10A Precisión básica: 0.1 %
Generador Síncrono de 4 polos	Marca : ASEA Gen 2 kVA x 0.8 - 220 VAC en Y, 5.25 A, 1500 rpm, 50 Hz Exc 110 V – 1.6 A
Motor de Corriente Continua DC - SHUNT	Marca : ASEA 1.5 kW , 1100 RPM , 220 V, 9 A ; Exc 220 V – 0.8 A
Reostato de arranque para el motor DC	1 kW, 200 V
Reostato de campo para el motor DC	500 ohm
Carga Resistiva	
Carga Inductiva	Y 3 x 380 V, 0.7 - 4.5 A
Carga Capacitiva	Y 3 x 380 V, 0.7 - 4.5 A

Tabla 1 - Equipos a utilizar en el Laboratorio Nro. 3

5. PROCEDIMIENTO

5.1. CONFIGURACIÓN DE EQUIPOS PARA EL ENSAYO

- Identificar los componentes requeridos:
 - Fuente de alimentación de tensión continua variable y constante.
 - Generador síncrono de armadura giratorio y 4 polos.
 - Motor de corriente continua de conexión Shunt.
 - Reóstato de arranque para el motor DC.
 - Reóstato de campo para el motor DC.
 - Carga Resistiva para el generador síncrono.
 - Carga Inductiva trifásica.
 - Carga capacitiva trifásica.
 - Vatímetro.
 - Tacómetro.
 - Multímetro.



Fig. 14 Equipos del Ensayo de Generador Síncrono



Fig. 15 Placa del Generador Síncrono de campo giratorio

Antes de la sesión del laboratorio se pide que calculen la velocidad de sincronismo con la información entregada y los valores nominales para los ensayos según los datos de placa en este caso la conexión será en estrella.

5.2. MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA ÓHMICA DE LAS BOBINAS DE ARMADURA

Realiza la medición del valor de las resistencias del bobinado de armadura con el multímetro y complete la tabla 2 con los valores obtenidos.

BOBINA	RESISTENCIA (Ω)
S1 - S4	
S2- S5	
S3 - S6	

Tabla 2 - Resistencia de armadura

Cuando se mide la resistencia del devanado de armadura debe considerarse que en operación la temperatura se incrementa y ello genera una variación en la resistencia del devanado.

5.3. CONEXIÓN DEL MOTOR PRIMO.

Para producir el movimiento del generador se utilizará un motor DC - shunt.

Con los siguientes componentes:

- Motor de corriente continua de conexión Shunt.
- Reóstato de arranque para el motor DC.
- Reóstato de campo para el motor DC.
- 1 amperímetro para la corriente de campo.
- 1 amperímetro para la corriente de armadura.

La conexión eléctrica se muestra en la Fig. 16.

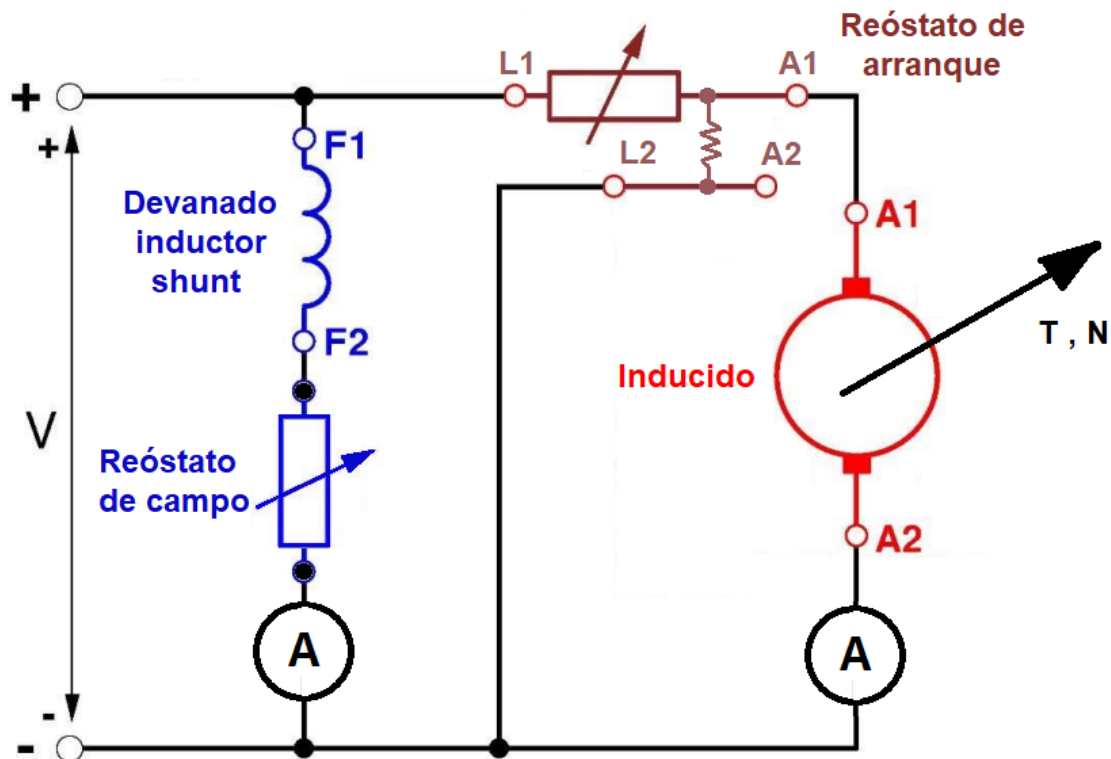


Fig. 16 Conexión del motor DC - Shunt

5.4. ENSAYO DE VACÍO.

Condiciones del ensayo de vacío:

- Velocidad de sincronismo.
- Generador sin carga eléctrica conectada.
- Corriente de excitación del generador variable desde un mínimo hasta llegar al nominal.

Finalidad del ensayo.

- Determinar la fuerza electromotriz inducida E_g para cada corriente de excitación.

Pasos:

Realizar la conexión según el esquema de la Fig. 17.

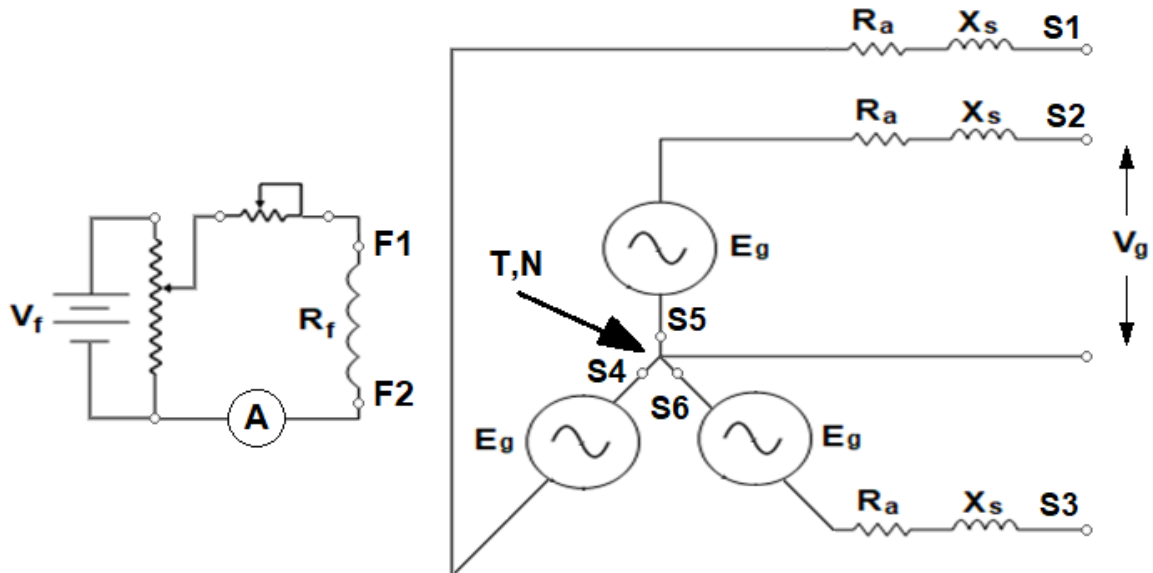


Fig. 17 Conexión para el ensayo de vacío

Con el circuito cableado según la Figura 17:

1. Encender la fuente de excitación del generador.
2. Controlar la corriente de excitación según los requerimientos de la Tabla 3 variando la perilla reguladora del reóstato de campo del generador. El voltaje de fase es medido.

Nota: Puede adicionar instrumentos para realizar el trabajo

Corriente de excitación I_f	I_f	Voltaje de Fase V_{Fg} Curva ascendente	I_f	Voltaje de Fase V_{Fg} Curva descendente
0.00				
0.20				
0.40				
0.60				
0.80				
1.00				
1.20				

1.40				
1.60				

Tabla 3 - Ensayo de Vacío

- Una vez culminada la tabla aumente la resistencia del reóstato y apague la fuente de alimentación del generador.

5.5. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO.

Condiciones del ensayo de cortocircuito:

- Velocidad de sincronismo.
- Generador cortocircuitado.
- Corrientes de excitación variables desde un mínimo hasta que la corriente de armadura llegue al valor nominal.

Finalidad del ensayo.

- Determinar la corriente de armadura circulante para cada corriente de excitación y calcular la impedancia síncrona X_s .

Pasos:

Realizar la conexión según el esquema de la Fig. 18.

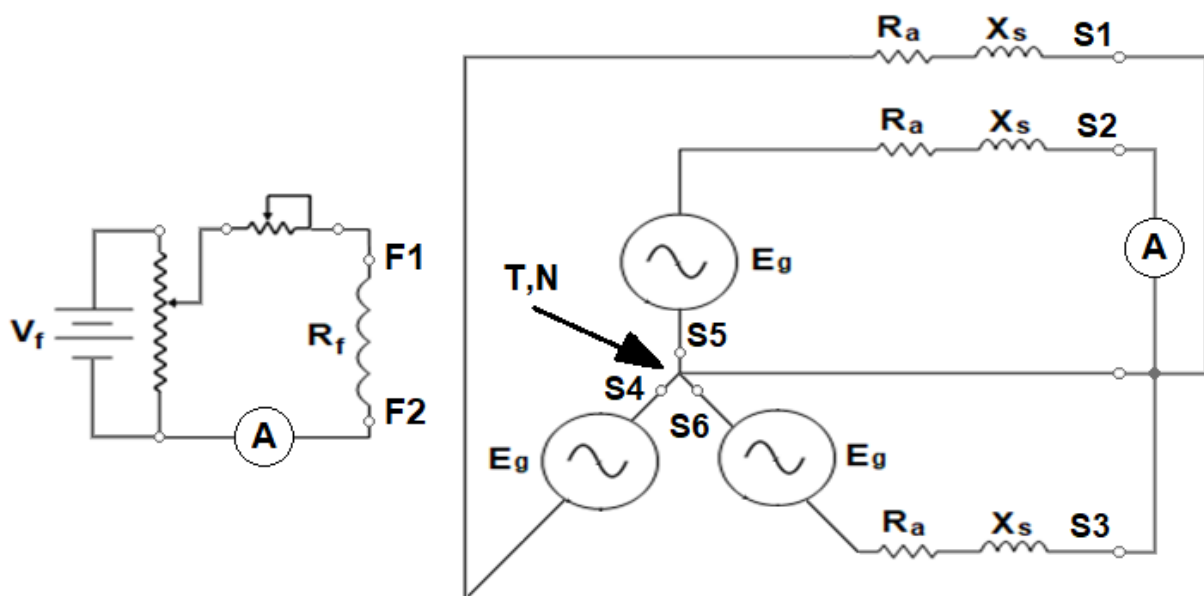


Fig. 18 Conexión para el ensayo de cortocircuito

1. Encender la fuente de excitación del generador.
2. Controlar la corriente de excitación según los requerimientos de la Tabla 4 variando la perilla reguladora del reóstato de campo del generador.

Nota: Puede adicionar multímetros para realizar el trabajo

Corriente de excitación I_f	Corriente de línea I_g
0.00	
	1.00
	2.00
	3.00
	4.00
	5.00
	5.25

Tabla 4 – Ensayo de Cortocircuito

3. Una vez culminada la tabla aumente la resistencia del reóstato y apague la fuente de alimentación del generador.

Con los resultados de los ensayos calcular la impedancia síncrona.

5.6. ENSAYOS CON CARGA

Con el motor primo y generador síncrono ya acoplados proceder a conectar la carga resistiva según la Fig. 19.

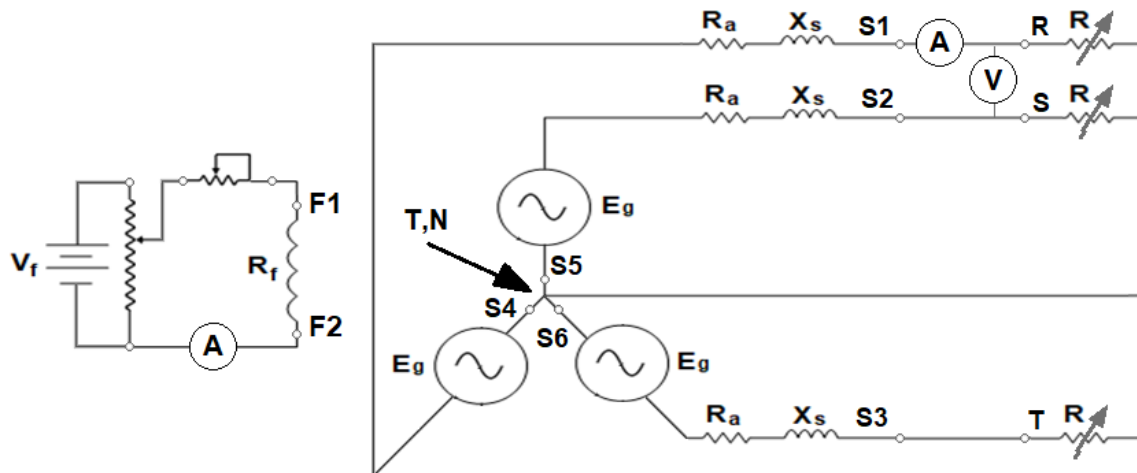


Fig. 19 Conexión para el ensayo con carga

5.6.1. Curva de Carga: $V_g - I_f$ (para I_g y FP constantes)

- a. Activar las resistencias según lo indicado en la Tabla 5

Carga Resistiva			
Posic - Interrup	I_g	V_g	I_f
6			
5			
4			
3			
2			
1			

Tabla 5 – Ensayo de Curva de Carga - Resistencia

- b. Regular la corriente de excitación con el reóstato de campo del generador hasta obtener una corriente de armadura igual a 2.5 A para cada posición de la tabla.
- c. Una vez culminada la tabla gire el reóstato a su posición de máxima resistencia.

5.6.2. Curva de Características exteriores: $V_g - I_g$ (I_f y FP constantes)

- a. Regular la corriente de excitación con el reóstato de campo del generador hasta obtener el voltaje de línea igual a 220V.
- b. Activar las resistencias según lo indicado en la Tabla 6.

Carga Resistiva			
Posic - Interrup	Ig	Vg	If
0			
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Tabla 6 – Ensayo de Características Exteriores - Resistencia

- c. Una vez culminada la tabla gire el reóstato a su posición de máxima resistencia.

5.6.3. Curva de regulación: $I_g - I_f$ (V_g y f_p constantes).

- a. Activar las resistencias según lo indicado en la Tabla 7.

Carga Resistiva			
Posic - Interrup	Ig	Vg	If
0			
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Tabla 7 – Ensayo de Regulación - Resistencia

- b. Regular la corriente de excitación con el reóstato de campo del generador hasta obtener el voltaje de línea igual al nominal en vacío 220V y apuntar los datos.
- c. Para cada posición guarde la información.
- d. Una vez culminada la tabla gire el reóstato a su posición de máxima resistencia, apague la fuente de alimentación de campo del generador.

Repetir los 3 ensayos para la carga inductiva y luego capacitiva.

Apagar equipos.

6. COMPLEMENTO DE LAS ACTIVIDADES DE MEDICIÓN:

- Preparar una explicación para realizar el equivalente monofásico del generador ensayado.
- Superponer en una gráfica los datos del ensayo de vacío graficar la curva E_g vs I_f con los datos del ensayo de cortocircuito graficar la curva I_g vs I_f para encontrar la reactancia síncrona.
- Crear un programa u hoja de cálculo para a partir de los datos de resistencias, el ensayo de vacío y el ensayo de cortocircuito se pueda calcular la impedancia síncrona y plantear el circuito equivalente.
- Crear un programa u hoja de cálculo para que con los datos del circuito equivalente se pueda estimar la corriente y el voltaje del generador para una determinada carga eléctrica.
- Analizar que sucede con las diversas cargas, velocidades y corrientes de excitación.
- Redactar observaciones y conclusiones.