

Generador Síncrono

(Modalidad Virtual)



Fig. 1 Generador Síncrono trifásico

1. OBJETIVOS A LOGRAR:

- Realizar el cableado del generador e instrumentos de medición.
- Medir parámetros eléctricos del generador en operación y ensayos.
- Realizar configuración del ensayo de vacío a condiciones del ensayo.
- Realizar configuración del ensayo de cortocircuito a condiciones del ensayo.
- Plantear el circuito equivalente del generador síncrono a partir de la medición de resistencia, los ensayos de vacío y cortocircuito.
- Definir el ensayo de regulación, de características exteriores y de carga.
- Plantear las curvas características del generador.

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.

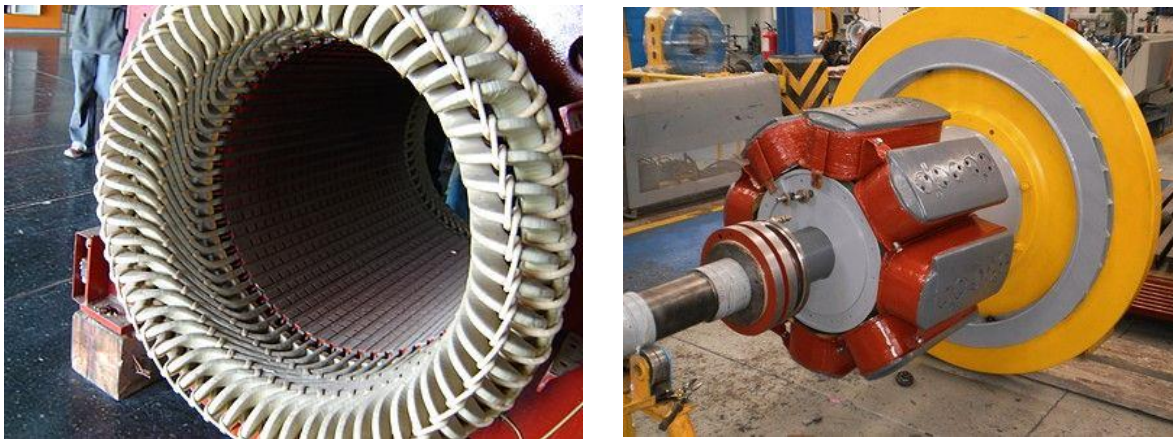


Fig. 2 Estator y rotor de polos salientes de un Generador Síncrono trifásico de campo giratorio



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.

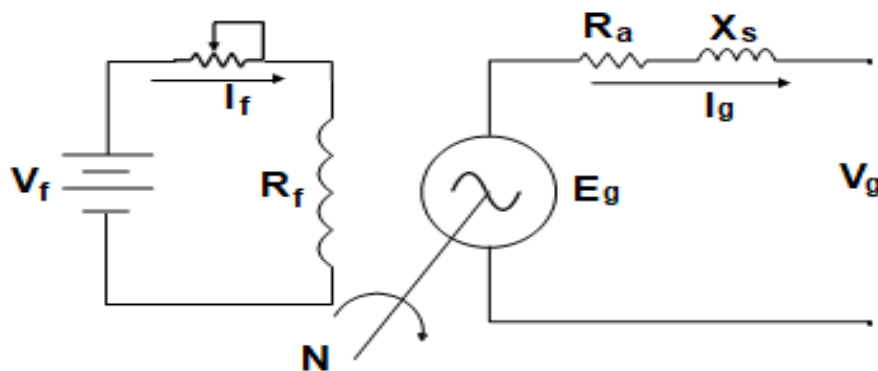


Fig. 4 Circuito equivalente de un motor asíncrono trifásico de jaula de ardilla

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 SÍNCRONA

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:

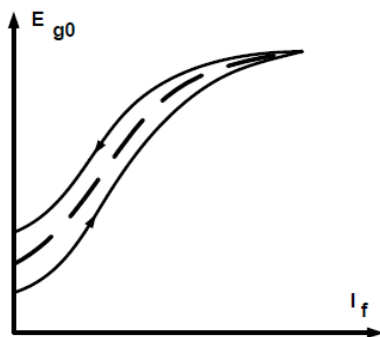


Fig. 5 Curva característica del circuito magnético

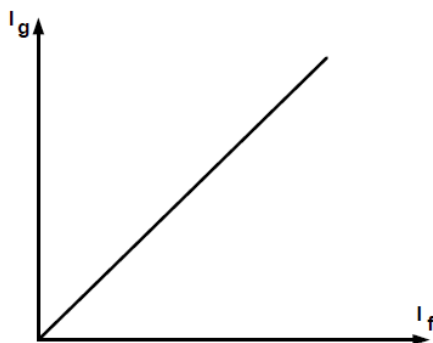


Fig. 6 Curva característica de cortocircuito.

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:

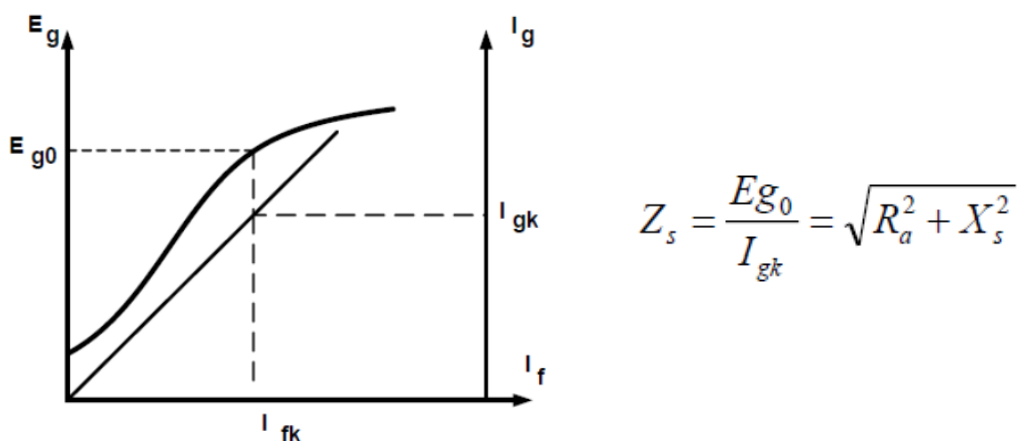


Fig. 7 Cálculo de la impedancia síncrona Z_s

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.

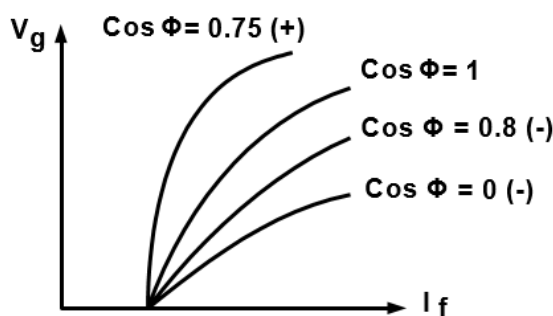


Fig. 8 Características con carga

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.

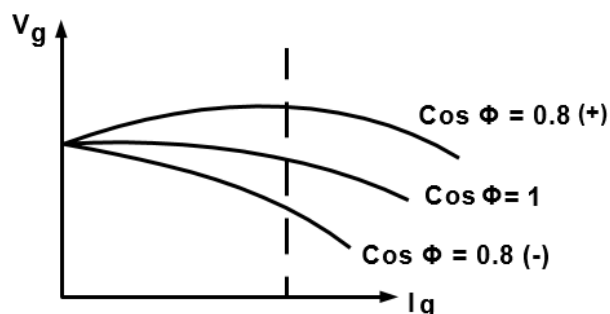


Fig. 9 Características exteriores

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.

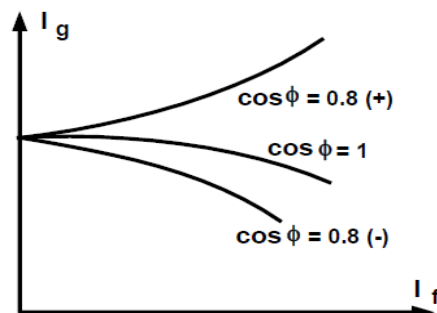


Fig. 10 Curvas de regulación

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:

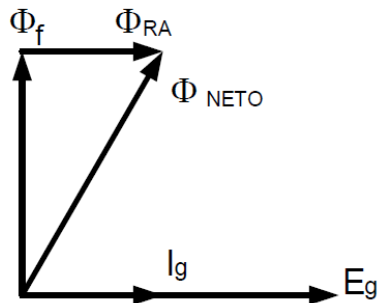


Fig. 11 Carga Resistiva

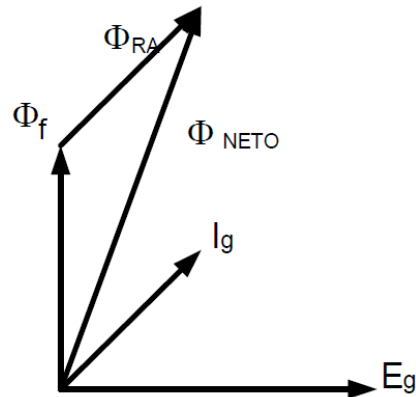
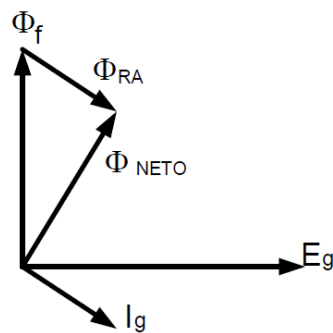


Fig. 12 Carga Capacitiva



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 la ficha técnica del generador a evaluar y determinar valores nominales para las pruebas a realizar.
- Realizar la medición de resistencias de armadura y campo.
- Realizar el cableado, colocación de instrumentos y condiciones de operación para el ensayo de vacío

- d. Realizar el cableado, colocación de instrumentos y condiciones de operación para el ensayo de cortocircuito del generador.

4. MATERIALES PARA LA REALIZACIÓN DEL LABORATORIO

- PC o Laptop con conexión a internet

4.1. LISTA DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS EN EL SOFTWARE

Código	Equipo	Características
8821	Fuente de alimentación	Tensión constante 120/208 VAC, 15 A, 60 Hz, 4 hilos Tensión variable 0-120/208 VAC. 5 A. 4 hilos Tensión variable 0-120 VDC, 8A Tensión constante 120 VDC, 2A
9063	Interfaz de adquisición de datos y control	Entrada de tensiones E1, E2, E3, E4; entrada de Corrientes I1, I2, I3, I4; entradas analógicas 7/T (torque), 8/n (velocidad); terminal común de la entrada/salida analógica; entrada de alimentación 24 VAC
8960-20	Dinamómetro / fuente de alimentación de cuatro cuadrantes	0-3 N-m, 0-2500 rpm, 350 W
8241	Motor/Alternador Síncrono trifásico de 4 polos	Generador 120 VA, 208 V, 0.33 A, 1800 rpm, 60 Hz.
8311	Carga resistiva	252 W, 120 V, 60 Hz 0.1 A, 1200 ohm 0.2 A, 600 ohm 0.4 A, 300 ohm

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

5. PROCEDIMIENTO

5.1. CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE PARA EL ENSAYO

- Abrir el software LVSIM configurar el sistema a 120 V y 60 Hz
- Desplazar a la consola principal según la Figura 5 los siguientes componentes:
 - Fuente de alimentación 8821
 - Motor/Alternador Síncrono trifásico de 4 polos 8241.

- Dinamómetro / fuente de alimentación de cuatro cuadrantes 8960-20.
- Interfaz de adquisición y control de datos 9063-20.
- Multímetro. (Cuando sea requerido)

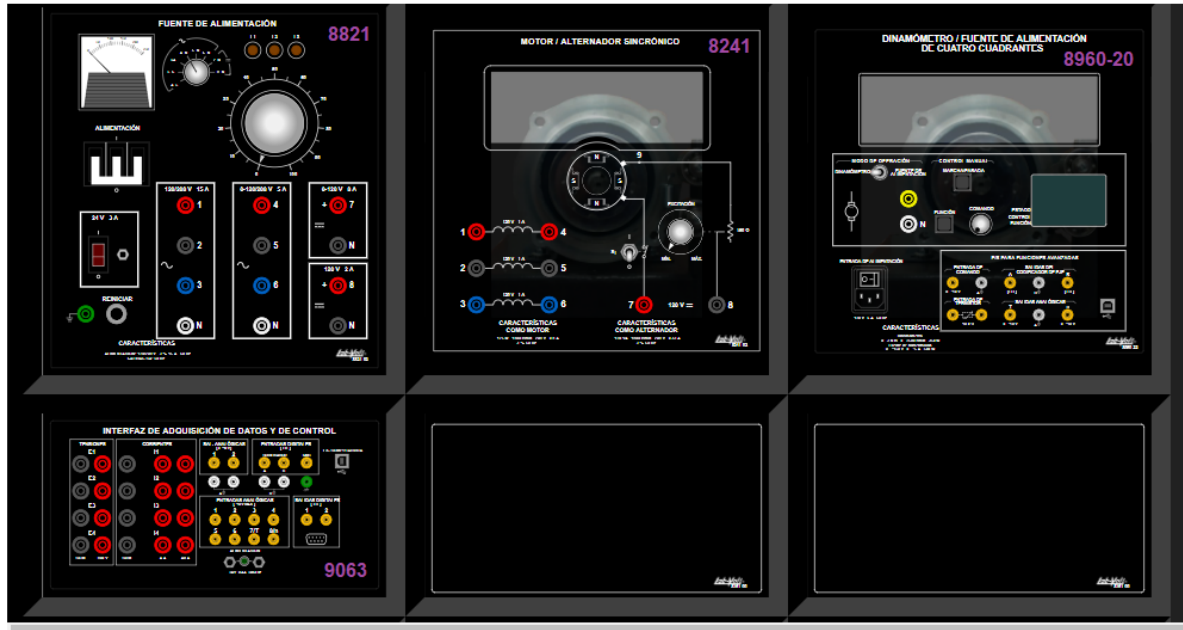


Fig. 14 Equipos del Ensayo de Generador Síncrono

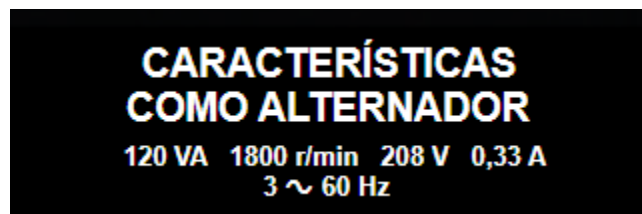


Fig. 15 Placa del Generador Síncrono en el simulador

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 (8241) con el multímetro virtual y complete la tabla 2 con los valores obtenidos.

BOBINA	RESISTENCIA (Ω)
1 - 4	
2- 5	
3 - 6	

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. (En el simulador no lo consideraremos)

5.3. REALIZAR LA CONEXIÓN MECÁNICA ENTRE GENERADOR Y DINAMOMETRO.

Bajar el panel frontal del motor y del dinamómetro (clic izquierdo del mouse sobre el panel frontal).

Colocar la faja entre las poleas (clic derecho en la polea y clic derecho en la otra polea).

Levantar el panel frontal del motor y del dinamómetro (clic izquierdo del mouse sobre el panel frontal).

5.4. ENSAYO DE VACIO.

Condiciones del ensayo de vacío:

- Velocidad de sincronismo.
- Generador sin carga eléctrica conectada.
- Corrientes de excitación variables 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. 16.

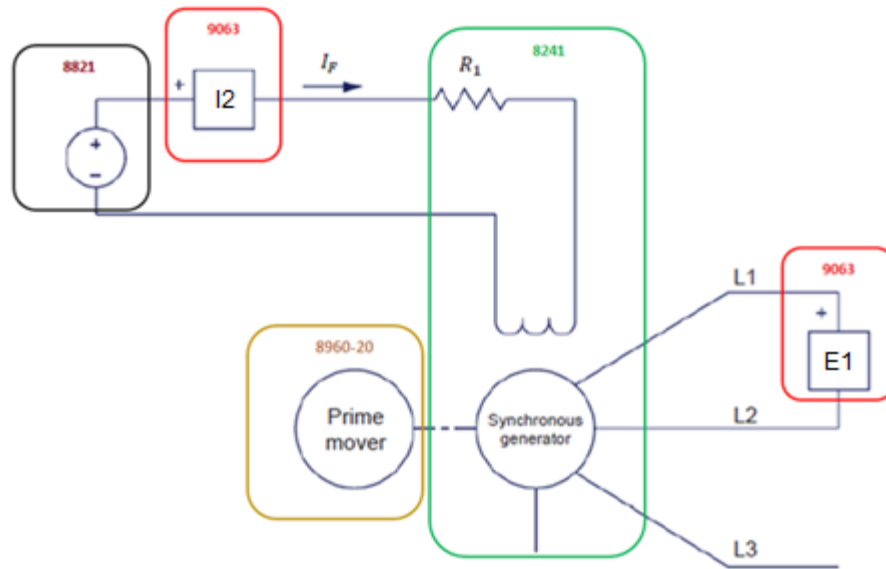


Fig. 16 Esquema de ensayo de vacío

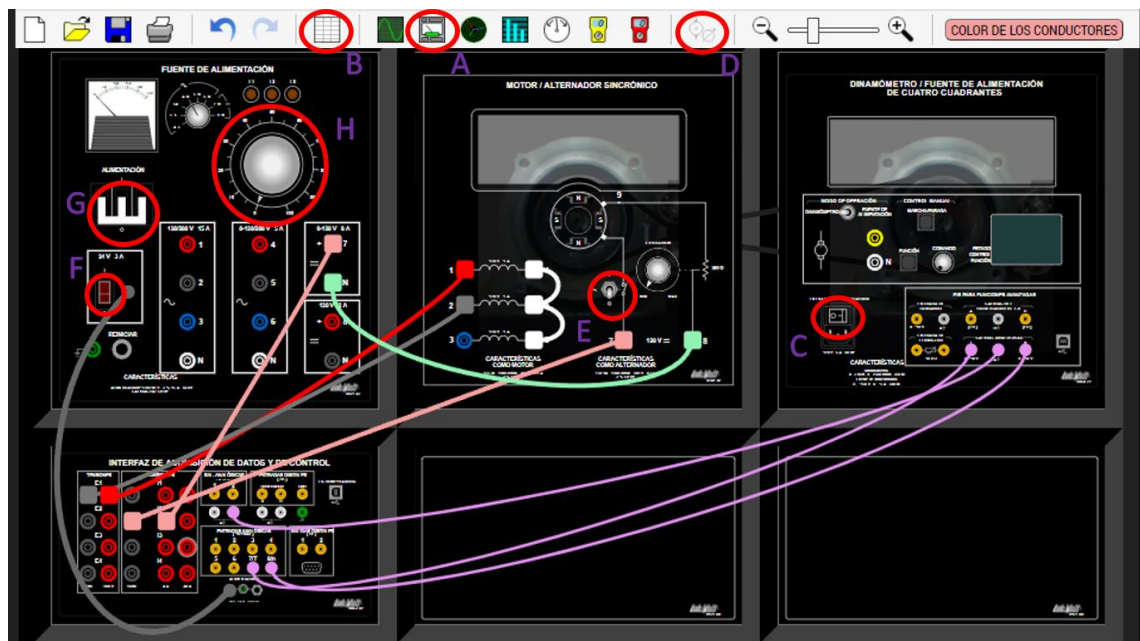


Fig. 17 Conexión para el ensayo de vacío

Con el circuito cableado según la Figura 17:

1. Configurar los Aparatos de medición en el icono de la barra del programa (A).

M1	M2	M3	M4	M5	M6
Voltaje de Linea					Torque
M7	M8	M9	M10	M11	M12
Corriente Excitación					RPM
M13	M14	M15	M16	M17	M18
					Potencia mecanica

Fig. 18 Configuración de instrumentos

- Configurar la tabla de datos en el icono de la barra del programa (B).
- Encender el dinamómetro (C).
- Configurar el dinamómetro en el icono de la barra del programa (D). Y **minimizar** la pantalla.

Función: Motor de impulsión / Freno de velocidad constante SH

Velocidad (rpm): 1800

Estado: En marcha

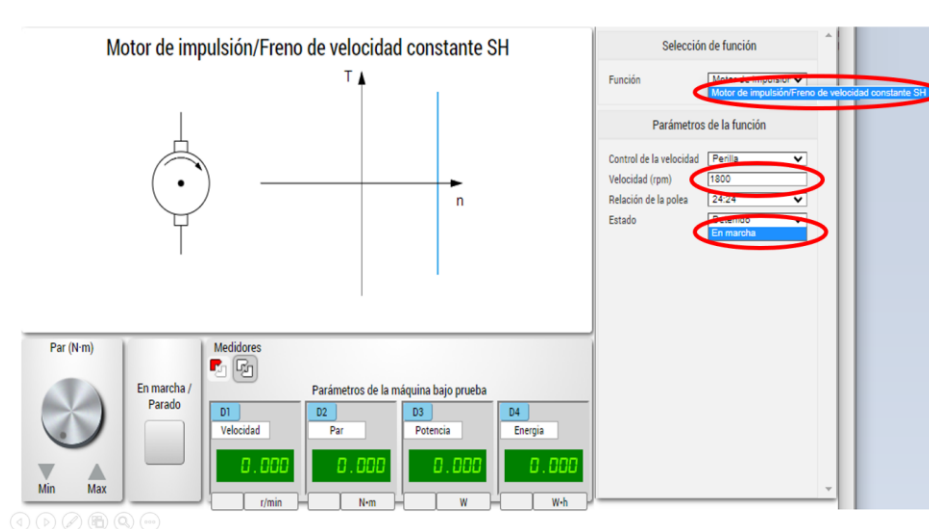


Fig. 19 Configuración del dinamómetro

- Cerrar el interruptor de paso a la corriente de excitación del Generador síncrono (E).
- Encender la alimentación eléctrica de la Interfaz de adquisición de datos (F).

7. Activar la llave de encendido de la fuente de alimentación (G).
8. Controlar la corriente de excitación según los requerimientos de la Tabla 2 variando la perilla reguladora de voltaje (H) y luego el reóstato (I) del generador. El voltaje de fase puede ser calculado o medido.

Nota: Puede adicionar multímetros para realizar el trabajo

Corriente de excitación I_f	Voltaje de Línea V_{Lg}	Voltaje de Fases V_{Fg}
0.20		
0.40		
	V nom (208)	V fase (120)

Tabla 3 - Ensayo de Vacío

9. Para cada posición guarde la información en la tabla de datos.
10. Una vez culminada la tabla aumente la resistencia del reóstato (I) y disminuya el voltaje de excitación girando la perilla (H), apague la fuente de alimentación (G).
11. Abrir el interruptor de paso a la corriente de excitación del Generador síncrono (E).
12. Guarde la información de la tabla en un archivo con el nombre de “ensayo de vacío generador”.
13. Luego borre los datos de la tabla para realizar el siguiente ensayo.

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. 20.

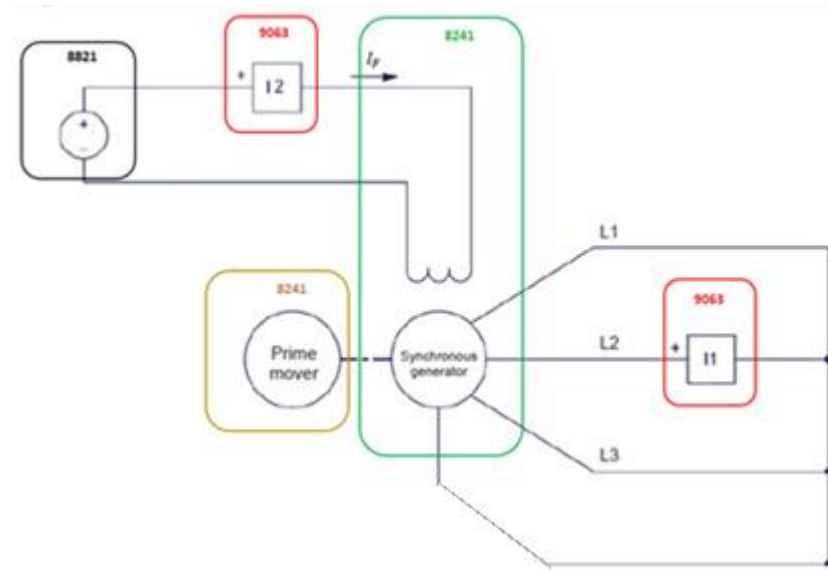


Fig. 20 Esquema de ensayo de cortocircuito

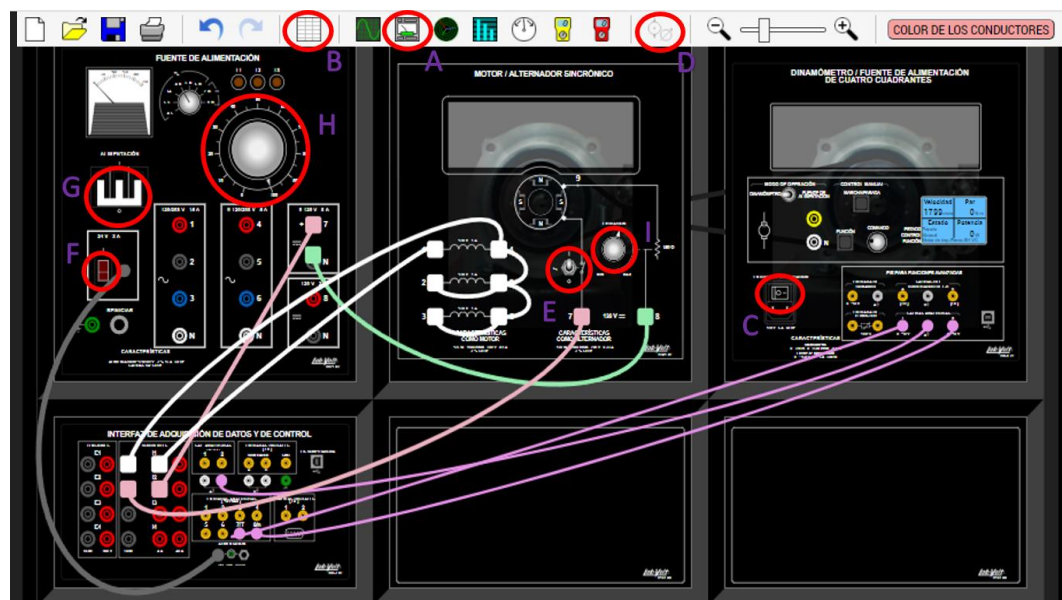


Fig. 21 Conexión para el ensayo de cortocircuito

Acondicionar el circuito al esquema de cortocircuito:

1. Configurar los Aparatos de medición en el icono de la barra del programa (A).

M1	M2	M3	M4	M5	M6
	Corriente de Línea				Torque
M7	M8	M9	M10	M11	M12
Corriente Excitación					RPM
M13	M14	M15	M16	M17	M18
					Potencia mecánica

Fig. 22 Configuración de instrumentos

2. Configurar la tabla de datos en el icono de la barra del programa (B).
3. Cerrar el interruptor de paso a la corriente de excitación del Generador síncrono (E).
4. Activar la llave de encendido de la fuente de alimentación (G).
5. Controlar la corriente de excitación según los requerimientos de la Tabla 4 variando la perilla reguladora de voltaje (H) y luego el reóstato (I) del generador.

Nota: Puede adicionar multímetros para realizar el trabajo

Corriente de excitación I_f	Corriente de línea I_g
0.050	
0.100	
	I_{nom} (0.33 A)

Tabla 4 – Ensayo de Cortocircuito

6. Para cada posición guarde la información en la tabla de datos.
7. Una vez culminada la tabla aumente la resistencia del reóstato (I) y disminuya el voltaje de excitación girando la perilla (H), apague la fuente de alimentación (G).
8. Abrir el interruptor de paso a la corriente de excitación del Generador síncrono (E).
9. Guarde la información de la tabla en un archivo con el nombre de “ensayo de

cortocircuito generador”.

10. Luego borre los datos de la tabla para realizar el siguiente ensayo.

Con los resultados de los ensayos calcular la impedancia síncrona.

5.6. Esquema de ensayos con carga

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

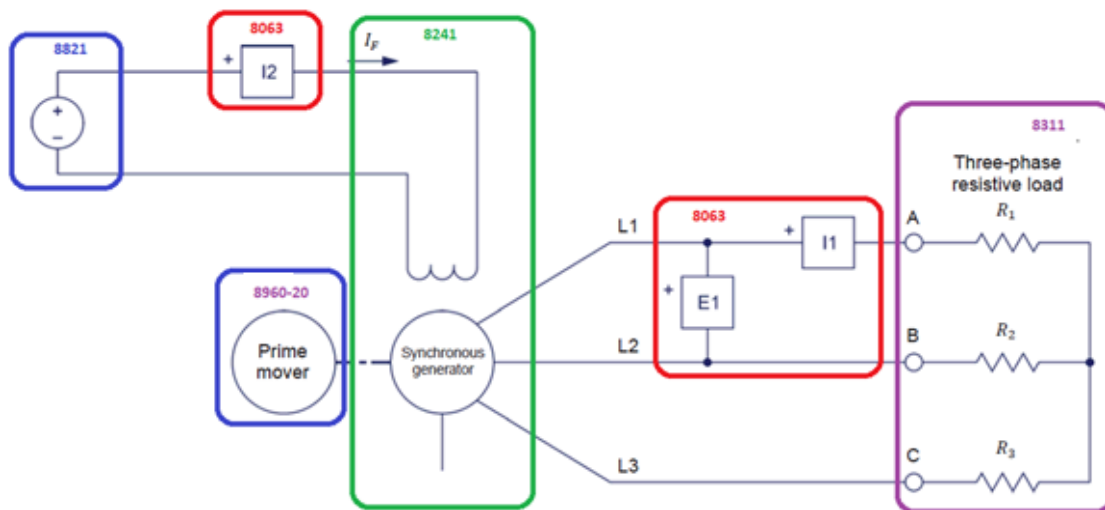


Fig. 23 Esquema de ensayos con carga

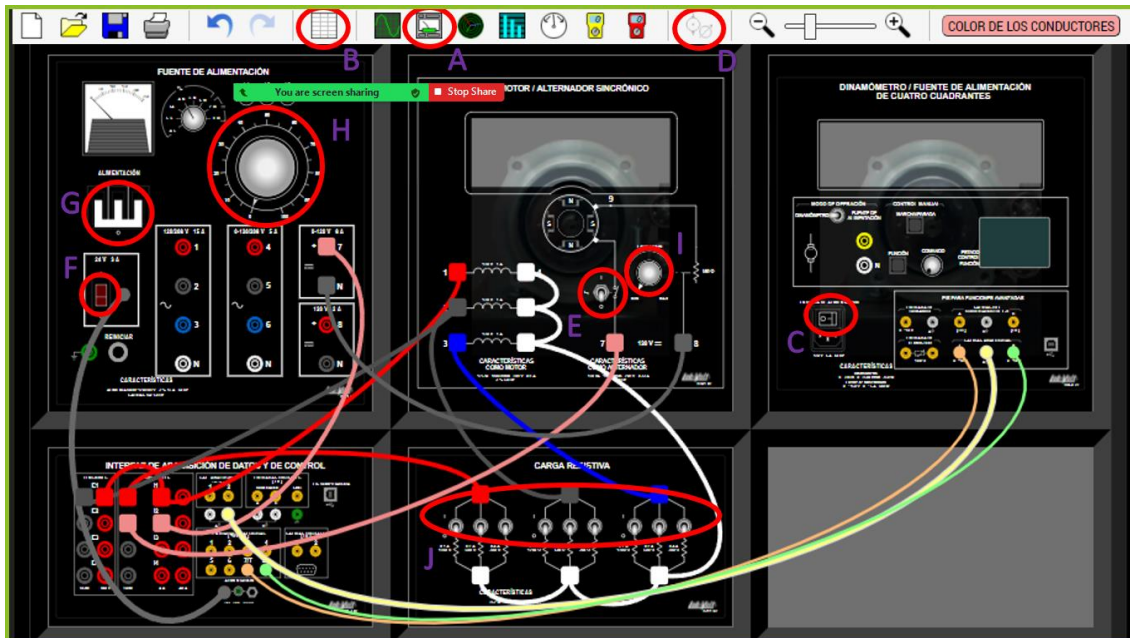


Fig. 25 - Conexión para el ensayo con carga

Acondicionar el circuito al esquema del ensayo con carga:

5.6.1. *Curva de regulación: $I_g - I_f$ ($V_g = 208$ y f_p constante=1).*

- Cerrar el interruptor de paso a la corriente de excitación del Generador síncrono (E).
- Configurar la tabla de datos en el icono de la barra del programa (B).

M1	M2	M3	M4	M5	M6
Voltaje de Línea	Corriente de Línea	P Trifásica	Q Trifásica	S Trifásica	Torque
M7	M8	M9	M10	M11	M12
Corriente Excitación					RPM
M13	M14	M15	M16	M17	M18
					Potencia mecánica

Fig. 26 – Configuración de instrumentos

- Activar la llave de encendido de la fuente de alimentación (G).
- Activar las resistencias según lo indicado en la Tabla 5.

Carga Resistiva					
Posic - Interrup	I arm	V F	I exc	P 3f	Pot mec
0 - 0 - 0		0,0			
1 - 0 - 0		0,0			
0 - 1 - 0		0,0			

Tabla 4 – Ensayo de Regulación - Resistencia

- Regular la corriente de excitación con las perrillas “H” e “I” hasta obtener el voltaje igual al nominal 208V.
- Guardar el valor de los parámetros en la tabla de datos.
- Para cada posición guarde la información en la tabla de datos.
- Una vez culminada la tabla gire el reóstato (I) y la perilla (H) en sentido anti-horario hasta su tope, apague la fuente de alimentación (G).
- Abrir el interruptor de paso a la corriente de excitación del Generador síncrono (E).
- Guarde la información de la tabla en un archivo con el nombre de “ensayo de carga - Resistencias”.
- Luego borre los datos de la tabla para realizar el siguiente ensayo.
- Al finalizar cada carga grabar la tabla de datos respectiva.
- Apagar equipos.

6. COMPLEMENTO DE LAS ACTIVIDADES DE MEDICIÓN:

- Enviar los circuitos desarrollados.
- Las 4 tablas en formato LVSIM