

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

MT 3004
Laboratorio de máquinas eléctricas para Mecatrónica

Laboratorio 12:

Conexión en paralelo de alternador sincrónico a la barra infinita

Emmanuel Naranjo Blanco

Profesora: Ing. Johanna Muñoz Pérez

Fecha de entrega: 24-05-2021

Índice

1. INTRODUCCIÓN	2
2. DESARROLLO PREVIO	3
3. RESULTADOS EXPERIMENTALES	8
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	13
5. CONCLUSIONES	14
6. BIBLIOGRAFÍA	15
7. ANEXOS	16
7.1. Especificaciones del generador utilizado en el laboratorio.	16

1. INTRODUCCIÓN

Muchas veces es necesario la conexión de múltiples generadores síncronos en paralelo para abastecer una carga determinada [1]. Realizar esta conexión en paralelo brinda numerosas ventajas, entre ellas, facilita la reparación de un equipo sin tener que detener el servicio, el trabajo de varias unidades en paralelo permite la máxima eficiencia dadas las fluctuaciones de carga, el agregar más unidades al sistema facilita suplir altas demandas de potencia; entre otros [2].

El presente reporte trata sobre la conexión de un alternador sincrónico a la barra infinita mediante el ambiente de simulación LabVolt. La red eléctrica representa una barra infinita porque contiene una gran cantidad de generadores en paralelo que el voltaje y la frecuencia de red se mantienen constantes. De este modo, para conectar un nuevo generador en paralelo, es necesario realizar una sincronización [1]. La cual requiere cumplir una serie de condiciones, que se explicarán en la siguiente sección.

La sincronización del generador con un sistema de energía debe realizarse con cuidado para evitar daños a la unidad ni al sistema de energía en sí [3]. Es así como en el presente reporte se presenta el procedimiento realizado en el laboratorio para conectar correctamente un alternador en paralelo; donde se tuvo como objetivo: conectar un generador sincrónico en paralelo con una barra infinita, comprobando todos los requisitos previos al cierre de la conexión, con los respectivos instrumentos.

De lo cual, se llegó a la conclusión de que la correcta conexión de un generador en paralelo a la barra infinita es fundamental, para evitar daños en el equipo y para controlar debidamente mediante distintos parámetros el abastecimiento de potencia a una carga.

2. DESARROLLO PREVIO

La sincronización del generador es el proceso de nivelar distintos parámetros como voltaje, frecuencia, ángulo de fase, secuencia de fase y forma de onda del alternador sincrónico con otro generador en paralelo o con una barra infinita para asegurar un funcionamiento sin problemas [1]. Para este caso, se conectó el generador a un bus infinito como se ilustra en la Figura 1.

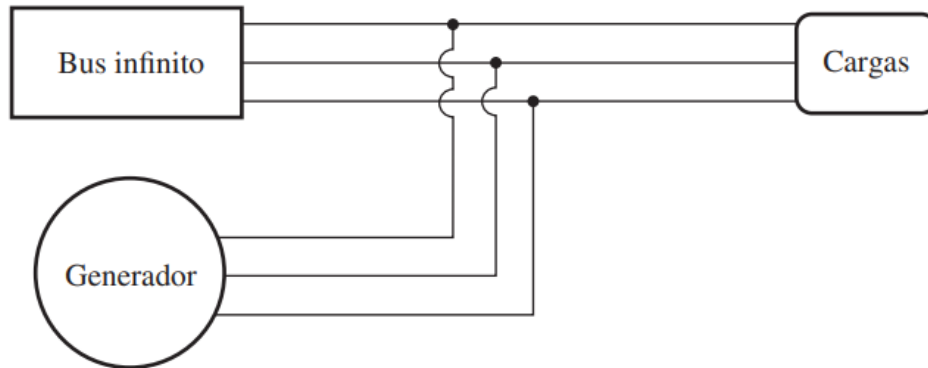


Figura 1: Generador síncrono conectado en paralelo con un bus infinito [4].

Para realizar la correcta sincronización, es necesario satisfacer las siguientes condiciones [1].

1. La frecuencia del generador es igual a la frecuencia del sistema.
2. El voltaje del generador es igual al voltaje del sistema.
3. El voltaje del generador está en fase con el voltaje del sistema
4. La secuencia de fases del generador es igual que la del sistema.

Una vez tomado en cuenta estas consideraciones, de forma experimental se armó el diagrama de la Figura 2, donde se conectaron los respectivos voltímetros y amperímetros para apoyarse durante la sincronización. Estas conexiones se realizaron en el simulador LabVolt como se visualiza en la Figura 3.

Para este caso particular, el equipo usado en la plataforma es el siguiente [5].

1. Fuente trifásica regulable N°8821.
2. Alternador sincrónico N°8241-20.
3. Dinamómetro N°8960-20.
4. Módulo de sincronización N8621.
5. Módulo de adquisición de datos N°9063.
6. Aparatos de medición, osciloscopio y sincronoscopio.
7. Cables conectores.

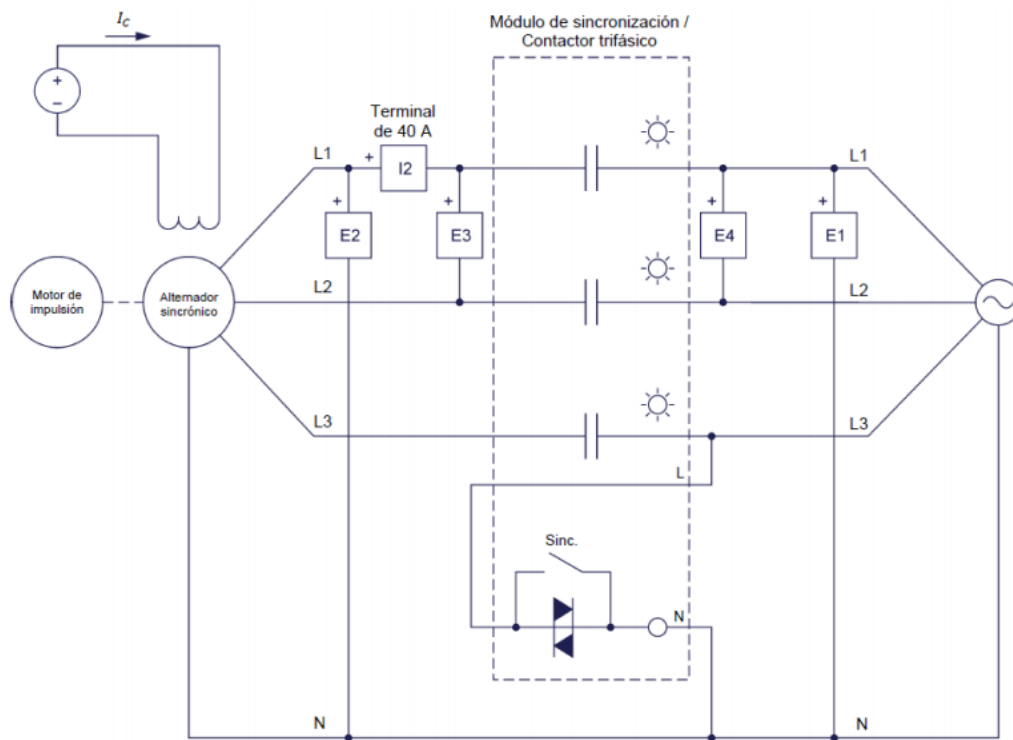


Figura 2: Diagrama de conexión para realizar el experimento [5].

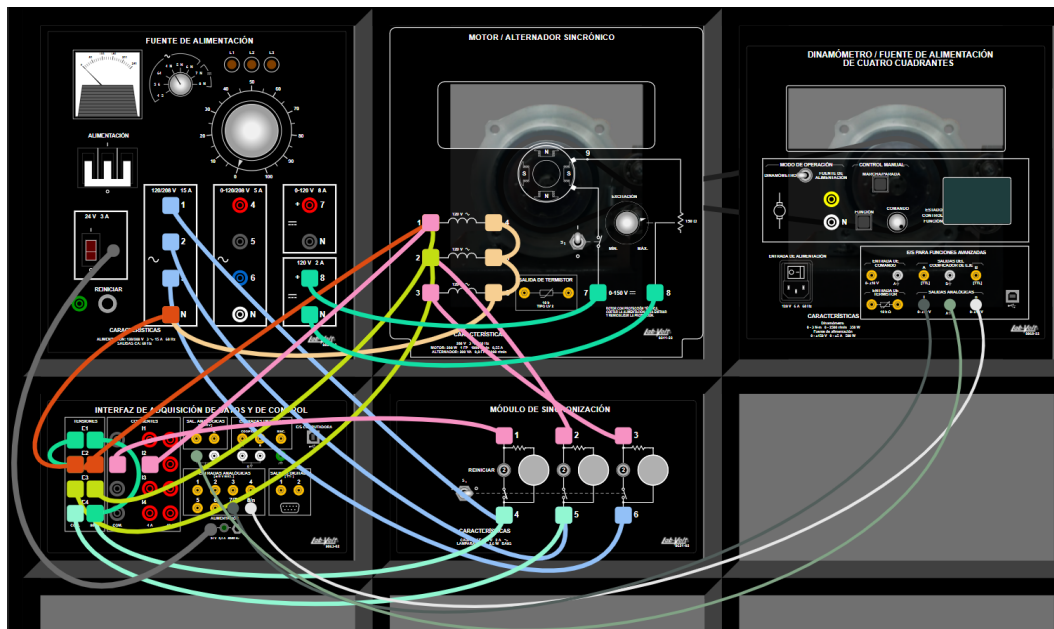


Figura 3: Conexión experimental en el simulador LabVolt [5].

De este modo, el procedimiento realizado en el laboratorio se presenta a continuación.

Primeramente, el alternador que se incorporó, se llevó a su velocidad nominal de 1800 rpm (ver apéndice 7.1) y se ajustaron sus voltajes de línea y fase para que tuvieran el mismo valor de la red de 120 / 208 V. La variación de la tensión en las terminales del generador está relacionada proporcionalmente con la corriente de campo como, la cual modifica el flujo magnético como se muestra en la ecuación 1.

$$E = K\phi\omega \quad (1)$$

Usualmente estos generadores reciben potencia mecánica a partir de turbina de vapor, turbinas hidráulicas o motores Diesel [4]. En este caso, el generador fue propulsado por un dinamómetro que adoptó la función de primotor de impulsión con sentido horario, y la barra infinita se representó por una fuente trifásica.

Seguidamente, se comprobó que ambos sistemas tuvieran la misma secuencia de fases. Para un alternador trifásico son posibles dos secuencias debido a que solo hay dos posibles direcciones de giro [6], como se visualiza en la Figura 4. Para verificar esto, se puede conectar un motor de inducción a la red y al generador, y observar la dirección de giro. Si esta es la misma, ambos tienen la misma secuencia de fases, de lo contrario habría que invertir el cableado. O bien, se puede utilizar el método de las tres bombillas. En este método, se conectan tres lámparas a través de las terminales abiertas del interruptor que conecta el generador al sistema como se indica en la Figura 5; si las tres lámparas lucen brillantes y se apagan al mismo tiempo, los sistemas tienen la misma secuencia de fase. Si las lámparas lucen brillantes sucesivamente, los sistemas tienen secuencias de fase opuestas y se debe invertir una de las secuencias. Este último método fue el empleado en el experimento.

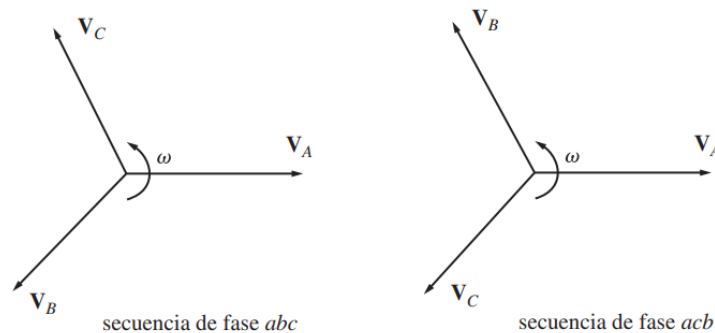


Figura 4: Secuencias de fase posibles en un sistema trifásico [4].

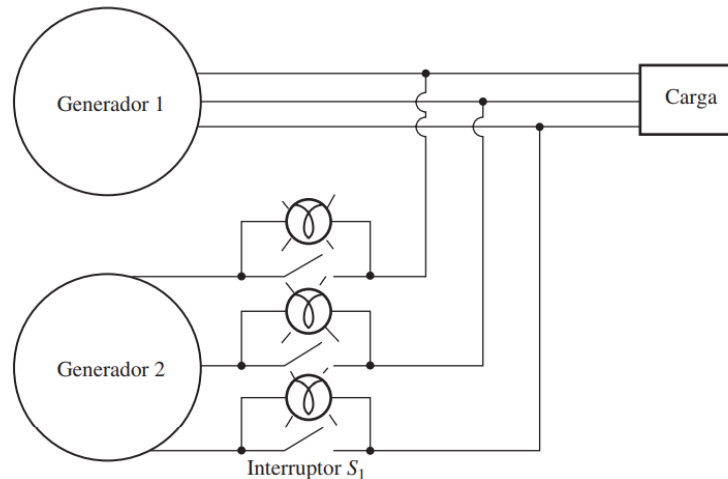


Figura 5: Método de las tres lámparas para encontrar la secuencia de fase [4].

Posteriormente se ajustó la frecuencia del generador mediante un ajuste en su velocidad, donde este se aceleró de forma tal que su frecuencia sea ligeramente mayor a la del bus infinito de 60 Hz. La frecuencia a la cual los alternadores funcionan, con un número fijo de polos, depende únicamente de la velocidad de giro del primotor como lo indica la ecuación 2.

$$f = \frac{\text{polos} \cdot \text{velocidad}}{120} \quad (2)$$

La razón por la que se requiere que el generador se conecte con una frecuencia ligeramente a 60 Hz es para que cuando este ingrese a la línea, suministre potencia como generador en lugar de consumirla como motor [4].

Luego se comprobó con el sincronoscopio los ángulos de fase. Como se presenta en la Figura 6, este consiste en un instrumento que contiene una aguja giratoria para indicar si la máquina que entra gira más lenta o rápidamente, y un índice fijo para indicar el instante de sincronización en que se debe cerrar el interruptor de conexión en paralelo [4]. Para esto, también se apoyó del osciloscopio donde se aprecia de forma gráfica los desfases entre las tensiones del alternador y de la red. De esta manera, se cerró el interruptor de conexión cuando los voltajes de fase a fase son iguales y opuestos. El alternador que entra quedó entonces sincronizado en la línea.

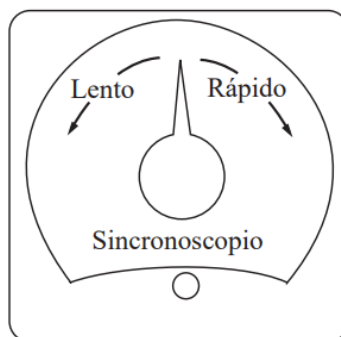


Figura 6: Sincronoscopio [4].

Por último, es importante destacar el comportamiento del generador en paralelo con grandes sistemas de potencia. Debido al efecto del bus infinito, el voltaje y la frecuencia no cambian, por lo tanto, las características de potencia y frecuencia del generador conectado se ilustran en la Figura 7 [4].

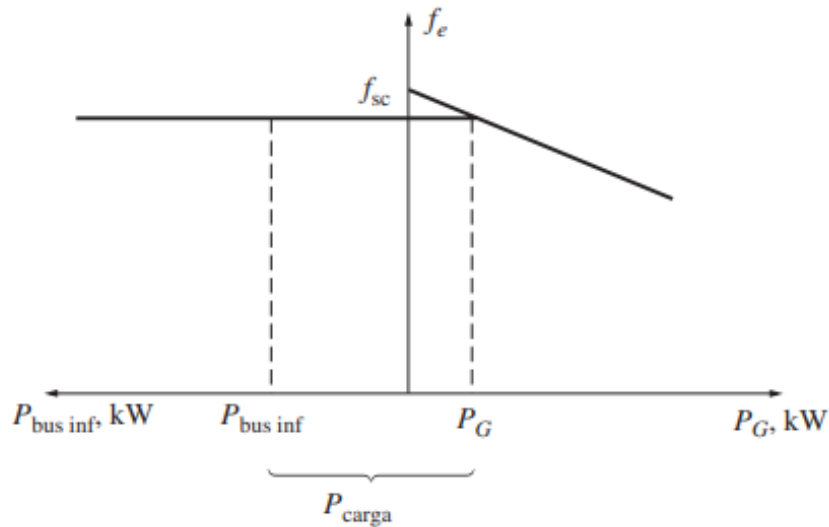


Figura 7: Gráfica de frecuencia en función de la potencia de un generador conectado a la red [4].

La potencia que suministra la máquina se puede variar con la corriente de excitación y/o el momento de torsión del primotor. Por un lado, variación de la corriente de excitación modifica la potencia reactiva, si se sobreexcita el generador este suministra potencia reactiva, y si se subexcita el generador, este absorbe potencia reactiva del sistema. Por otro lado, la variación de la velocidad del primotor modifica la potencia activa suministrada, donde un incremento del par provocará que el generador alimente mayor potencia activa al sistema [1].

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El experimento realizado se basó principalmente en conectar apropiadamente el generador síncrono al bus infinito y no en la toma de datos para su respectivo análisis. No obstante, a continuación, se presenta la información analizada para comprobar la correcta sincronización siguiendo el procedimiento establecido.

Los cuadros 1 y 2 muestran los valores de tensión de línea y fase, así como la frecuencia de la barra infinita y del generador síncrono conectado antes y después de la sincronización.

Cuadro 1: Resultados experimentales de las tensiones de línea y fase antes de la sincronización.

	V línea (± 0.1) V	V fase (± 0.1) V	VF frecuencia (± 0.01) Hz
Generador	177.0	102.1	60.49
Red	216.4	124.9	60.49

Cuadro 2: Resultados experimentales de las tensiones de línea y fase luego de la sincronización.

	V línea (± 0.1) V	V fase (± 0.1) V	VF frecuencia (± 0.01) Hz
Generador	216.5	125.0	60.00
Red	216.5	125.0	60.00

Además, desde la Figura 8 hasta la Figura 17 resaltan una visualización como respaldo del procedimiento realizado en el laboratorio.

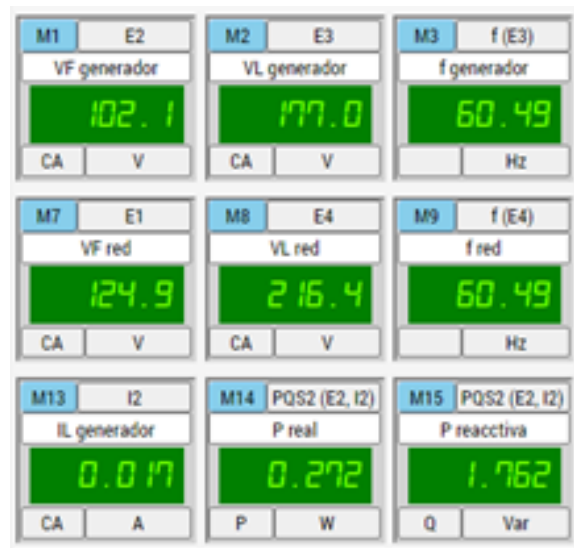


Figura 8: Resultados experimentales antes de realizar la sincronización mostrados en el Cuadro 1.

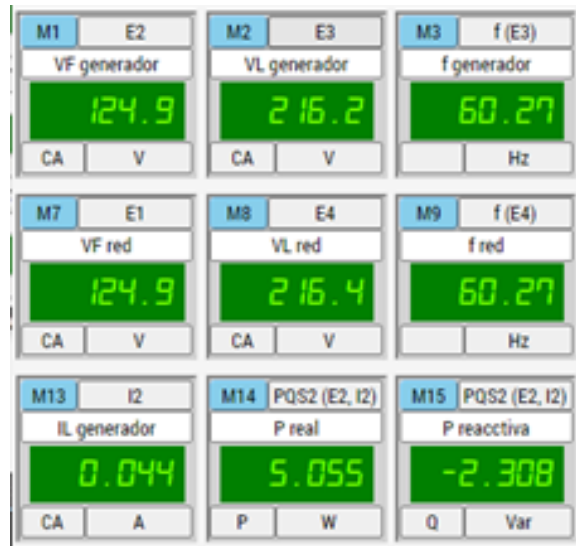


Figura 9: Resultados experimentales al ajustar las tensiones de línea y fase del generador con la red.

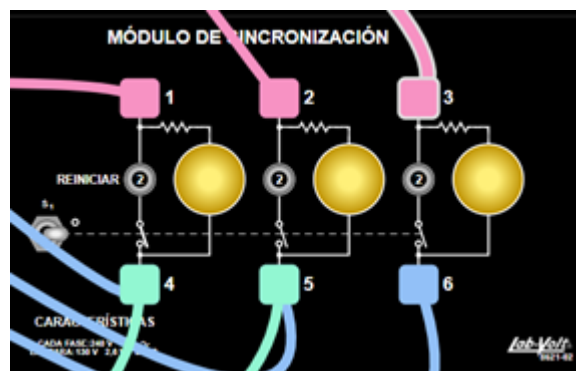


Figura 10: Comprobación de la misma secuencia de fases para cada sistema.

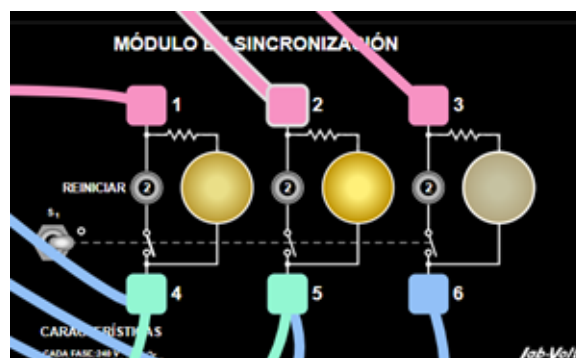


Figura 11: Resultado de secuencias de fases distintas entre el generador y la red.

Velocidad	Par
1804 _{r/min}	0.141 _{N·m}
Estado	Potencia
En marcha Manual Motor de impulsión/Freno SH	26.65 _W

Figura 12: Aceleración del generador para que este tuviera mayor frecuencia.

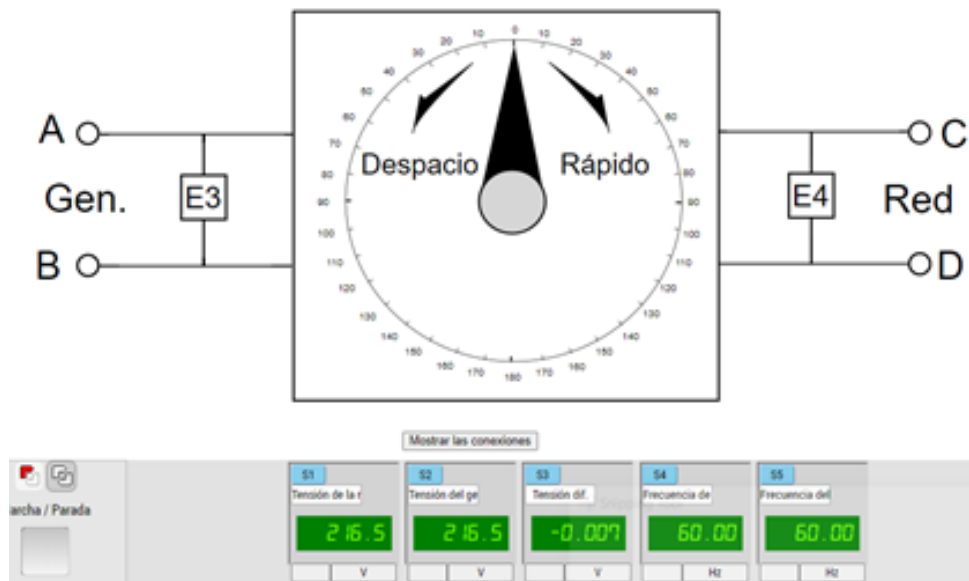


Figura 13: Uso del sincroscopio para observar las fases.

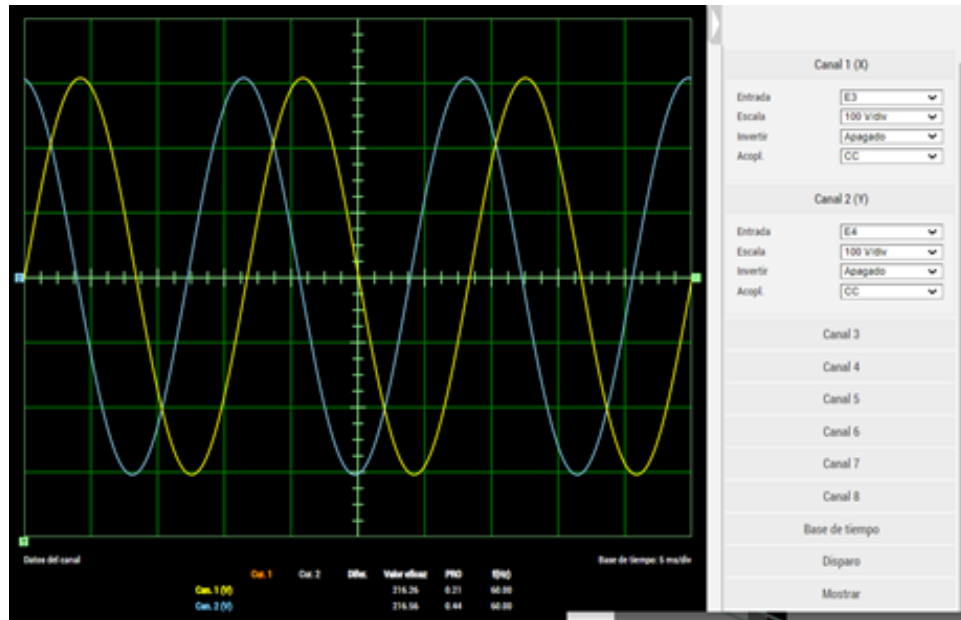


Figura 14: Uso del osciloscopio para comparar los ángulos de fase y la frecuencia del generador donde el eje X es el tiempo y el eje Y la tensión.

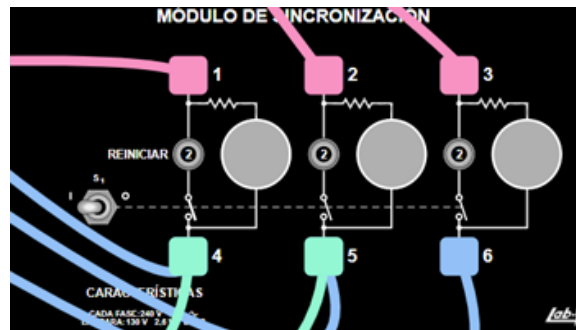


Figura 15: Cierre del circuito con la barra infinita.

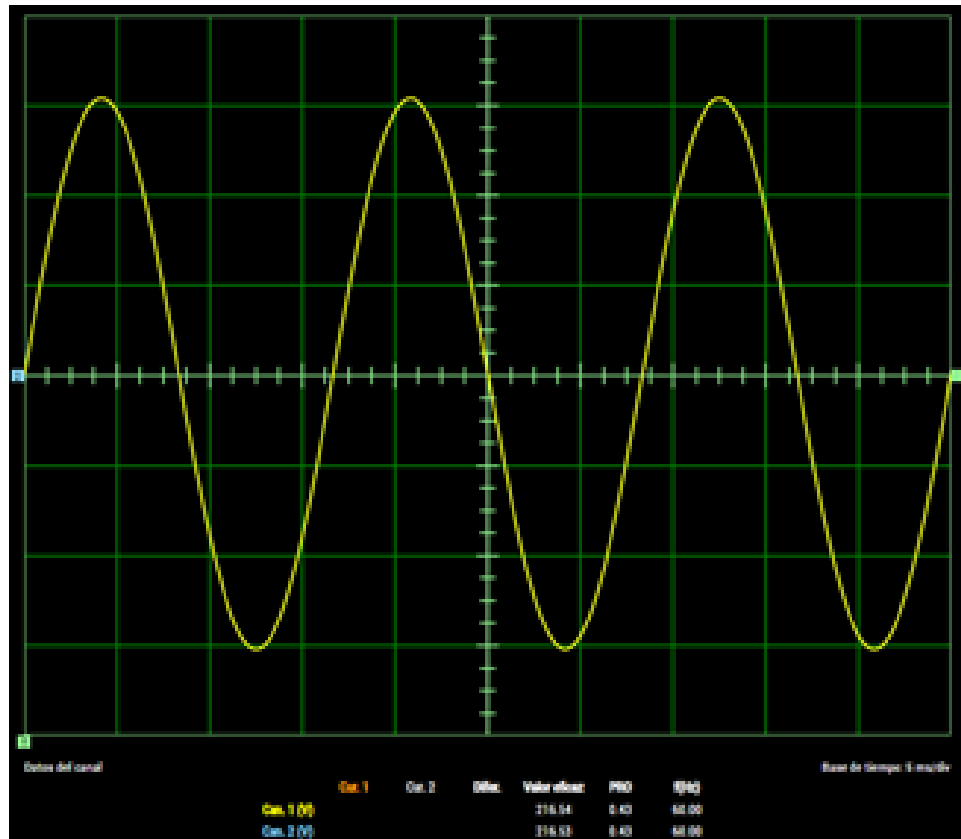


Figura 16: Resultado de la sincronización con el osciloscopio donde el eje X es el tiempo y el eje Y la tensión.

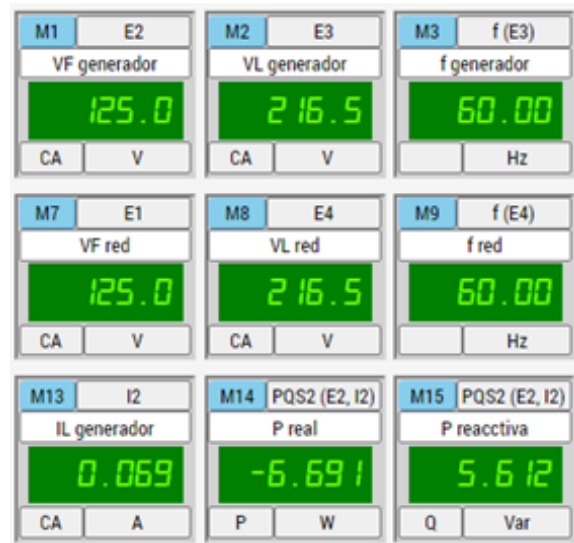


Figura 17: Resultados de medición una vez sincronizado el generador mostrados en el Cuadro 2.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para que el generador funcione correctamente en paralelo con las demás máquinas síncronas y que entregue potencia a la red, es necesario realizar la sincronización al sistema. A continuación, se presenta el análisis del procedimiento realizado en el laboratorio.

Una vez que se puso en marcha el generador a 1800 rpm, se observó que las tensiones de línea y fase entre el equipo y la barra infinita eran distintas, indicado en el Cuadro 1. Realizar la conexión en estas condiciones podría dañar el equipo y afectar la carga, por esta razón, mediante una variación de la corriente de campo se modificó la tensión hasta que alcanzara valores similares a las tensiones de la red como se observa en la Figura 9.

Posteriormente se analizaron las frecuencias de fase mediante el método de las tres bombillas. Como se explicó anteriormente, es requerido que se tenga la misma secuencia de fases en ambos mecanismos y se verificó cuando las tres bombillas se encendieron y apagaron en el mismo instante como se muestra en la Figura 10. De lo contrario, se observa que los bombillos se enciendan de forma intermitente como se ve en la Figura 11.

Una vez conocidas las secuencias de fases, se ajustó la frecuencia a un valor ligeramente mayor, para esto se llevó que el primotor girara a 1804 rpm como se muestra en la Figura 12. Esto se realizó para que el generador ingresara a la red aportando potencia como indica la teoría. Además, mediante el sincronoscopio y el osciloscopio, se observó el comportamiento de la tensión de línea de una de las fases del generador y de la barra infinita, lo cual se presenta en las Figuras 13 y 14 respectivamente. Debido a que es necesario que las fases sean iguales, se cerró el circuito cuando el sincronoscopio marcó el punto de equilibrio 0 como se ve en la Figura 13. De este modo, como las tensiones de línea y fase entre el alternador y el bus infinito son iguales como se anotó en el Cuadro 2, la diferencia de tensión en las bombillas es cero y permanecen apagadas, tal y como lo indica la Figura 15. Además, se observa también en el osciloscopio de la Figura 16 que ambas tensiones se mantienen en fase.

Por último, una vez cerrado el circuito con la barra infinita, se observó que al variar la velocidad del primotor, se modificó la potencia activa que suministraba el generador. Además, con el cambio de la corriente de campo mediante el reóstato se notó variación de la potencia reactiva suministrada a la red, la cual podía ser positiva o negativa. Esto permite corroborar que el generador estaba funcionando correctamente y que se dio la sincronización como se esperaba.

5. CONCLUSIONES

Seguidamente, se presentan las conclusiones más relevantes del experimento.

1. Se logró comprobar todos los requisitos previos a la conexión en paralelo del alternador síncrono a la barra infinita.
2. Al realizar la sincronización se observó la versatilidad de la conexión de generadores en paralelo debido a que se pueden conectar o desconectar según la demanda de potencia.
3. Una vez el alternador se sincronizó en la línea, se hace que este aporte potencia activa con el aumento de la velocidad del primotor.
4. Una vez realizada la sincronización, mediante el reóstato de campo del generador que varía la corriente de campo, se ajusta la potencia reactiva.
5. Es importante que el generador ingrese con una frecuencia ligeramente mayor para evitar que este ingrese a la línea como motor.
6. Al finalizar la conexión se observó que la frecuencia, la tensión de línea y la tensión de fase se convirtieron en valores constantes.

6. BIBLIOGRAFÍA

Referencias

- [1] Wildi, Th. *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*. 6 ed. Prentice Hall. México, 2007.
- [2] L. Fernández, Consulting - Specifying Engineer — Paralleling generator systems”, Consulting - Specifying Engineer, 2016. [Online]. Disponible en: <https://www.csemag.com/articles/paralleling-generator-systems/:text=Benefits>
- [3] "What is Generator Synchronization? - Woodstock Power”, Woodstock Power, 2021. [Online]. Disponible en <https://woodstockpower.com/blog/generator-synchronization/>
- [4] Chapman, S. *Máquinas Eléctricas*. McGraw Hill. 5ed., México, 2006.
- [5] "Laboratorio N° 12: Conexión en paralelo de alternador sincrónico a la barra infinita". 2021. [documento pdf].
- [6] Kosow, I. *Máquinas Eléctricas y transformadores*. 2ed., Prentice Hall, Mexico, 1991.

7. ANEXOS

7.1. Especificaciones del generador utilizado en el laboratorio.

Specifications

Parameter	Value
Power Requirement	120/208 V
Motor	
Stator Voltage	120/208 V, three-phase
Rotor Voltage	0-150 V dc
Output Power	200 W
Synchronous Speed	1800 r/min
Full-Load Current	0.55 A
Power Factor	1
Generator	
Stator Voltage	120/208 V, three-phase
Rotor Voltage	0-150 V dc
Output Power	200 VA
Synchronous Speed	1800 r/min
Power Factor	0.8
Protection	
Type	10 k Ω thermistor, type 2, in the stator winding, and rotor field bimetal thermal protection
Physical Characteristics	
Dimensions (H x W x D)	308 x 291 x 440 mm (12.1 x 11.5 x 17.3 in)
Net Weight	TBE

Figura 18: Especificaciones del generador experimental de la plataforma LabVolt.