

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas  
Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

## IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO MOTOR-GENERADOR ELÉCTRICO EN EL LABORATORIO DE LA CARRERA INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de grado presentado ante la Universidad Técnica del Norte previo a la  
obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico

AUTOR:

Piero Fabricio García Cifuentes

DIRECTOR:

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

Ibarra – Ecuador

2021



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO		
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	100467880-9	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	García Cifuentes Piero Fabricio	
<b>DIRECCIÓN:</b>	General Pintag	
<b>EMAIL:</b>	<a href="mailto:pfgarciac@utn.edu.ec">pfgarciac@utn.edu.ec</a>	
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	+593989004726

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	Implementación de un módulo motor-generador eléctrico en el laboratorio de la carrera ingeniería eléctrica.
<b>AUTOR:</b>	García Cifuentes Piero Fabricio
<b>FECHA: DD/MM/AA</b>	21/09/2021
<b>SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO</b>	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSTGRADO</b>
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniería en mantenimiento eléctrico
<b>ASESOR / DIRECTOR</b>	Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

## 2. CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que se asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad Técnica del Norte en caso de reclamo por parte de terceros.

Ibarra, a los 21 días del mes de septiembre de 2021

EL AUTOR:



---

Piero Fabricio García Cifuentes

1004678809

## CERTIFICACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

Yo, Jhonny Javier Barzola Iza en calidad de tutor del señor, Piero Fabricio García Cifuentes certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de grado titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO MOTOR-GENERADOR ELÉCTRICO EN EL LABORATORIO DE LA CARRERA INGENIERÍA ELÉCTRICA"**. Para la obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico; aprobando la defensa, impresión y empastado.



Ing. Jhonny Javier Barzola Iza, MSc.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO**

## **Dedicatoria**

Conozco a una persona que siempre da más de sí misma por ver felices a los que más ama, que tiene un corazón inmenso, no teme dar sin recibir nada a cambio, que ayuda sin miedo a quedarse sin nada, la persona que me impulsa, que cree en mis metas y sueños, ella es mi madre.

El presente trabajo lo dedico a mi Madre Myriam Cifuentes, quien me ha enseñado que las metas se logran con esfuerzo y constancia, gracias por todo el apoyo, el aliento para continuar en los momentos más difíciles de mi vida personal y profesional, por todos sus consejos, que me han ayudado a completar mi trabajo de grado.

## **Agradecimiento**

Agradezco a mi casona universitaria, la gloriosa **Universidad Técnica del Norte**, en la que se me brindó la educación para obtener mi título de pregrado con docentes de calidad profesional y humana. A mi familia, principalmente a mi madre Myriam, a mi hermana Vanessa y a mi hermano Santiago, que siempre me ayudaron a entender y tener claro mi objetivo de vida y por creer siempre en mí. A mi director de trabajo de grado, Ing. Jhonny Barzola MSc., gracias a su guía e interés pude completar este trabajo. A un gran amigo Edwin Esparza, una persona de calidad quien me brindó su ayuda de manera desinteresada. A Cesar Caza quien es un amigo y un ejemplo de persona para mi desde que empecé mi carrera universitaria. A mis amigos y compañeros de clase con los cuales disfrutamos muchas experiencias en el trayecto de nuestra vida universitaria.

## Tabla de Contenido

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA .....	II
2. CONSTANCIA .....	III
CERTIFICACIÓN DE TRABAJO DE GRADO .....	IV
DEDICATORIA .....	V
AGRADECIMIENTO .....	VI
TABLA DE CONTENIDO.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
RESUMEN .....	XII
ABSTRACT .....	XIII
INTRODUCCIÓN .....	XIV
A.1. CONTEXTUALIZACIÓN .....	XIV
A.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	XV
A.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	XV
A.4. OBJETIVO GENERAL.....	XVI
A.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	XVI
A.6. JUSTIFICACIÓN .....	XVI
A.7. ALCANCE .....	XVII

### CAPÍTULO I

1.1. Maquina síncrona.....	1
1.2. Generadores síncronos .....	2
1.3. Operación del generador síncrono.....	7
1.3.1. Funcionamiento de generador síncrono en red aislada .....	7
1.3.2. Funcionamiento del generador síncrono acoplado a una red de barra infinita.....	8
1.3.3. Funcionamiento del generador síncrono acoplado a un alternador en paralelo con potencia semejante. ....	10
1.3.4. Sincronización del generador síncrono .....	12

1.3.5.	Curva de capacidad del generador síncrono .....	14
<b>1.4.</b>	<b>Sistema de protecciones para el generador síncrono .....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO I</b>		
<b>1.1.</b>	<b>Diseño del módulo motor-generador .....</b>	<b>25</b>
1.1.1.	Estructura metálica soporte para el módulo motor-generador .....	25
1.1.2.	Diseño del cuadro de control y circuito eléctrico .....	27
1.1.3.	Equipos y materiales .....	29
<b>1.2.</b>	<b>Implementación del módulo motor-generador .....</b>	<b>39</b>
1.2.1.	Elaboración de la estructura metálica .....	40
1.2.2.	Construcción y nivelación del acople entre el motor principal y el generador ....	40
1.2.3.	Armado del tablero de control .....	42
1.2.4.	Variador de frecuencia .....	42
<b>1.3.</b>	<b>Funcionamiento del módulo motor-generador.....</b>	<b>43</b>
<b>CAPÍTULO III</b>		
<b>3.4.</b>	<b>Preparación previa del módulo motor-generador .....</b>	<b>48</b>
3.4.1.	Conexionado al trabajar generando en red aislada .....	50
3.4.2.	Conexionado cuando el generador trabaja acoplado a una red barra infinita ....	52
3.4.3.	Preparación del tablero de control .....	53
<b>3.5.</b>	<b>Prueba del generador síncrono en red aislada .....</b>	<b>53</b>
<b>3.6.</b>	<b>Prueba del generador síncrono acoplado a la barra infinita .....</b>	<b>56</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>63</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>		<b>64</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>65</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>69</b>
	Anexo A Instalación de las borneras de los terminales del generador ..	69
	Anexo B Instalación de las borneras de los terminales de motor principal .....	70
	Anexo C Proceso de mantenimiento del generador síncrono.....	71
	Anexo D Proceso de construcción del módulo .....	71
	Anexo E Manual del variador de frecuencia .....	71
	Anexo F Catalogo del motor Jaula de ardilla .....	71

Anexo G Manual de mantenimiento y operación del módulo motor- generador .....	72
--	----

## Índice de Figuras

Figura 1.1 Diagrama de fases en un generador síncrono trifásico .....	4
Figura 1.2 Circuito equivalente por fase de un generador síncrono .....	5
Figura 1.3 Circuito equivalente del generador síncrono en el marco dq0 .....	6
Figura 1.4 Un solo generador que alimenta una carga .....	7
Figura 1.5 Generador síncrono que opera en paralelo con un bus infinito .....	9
Figura 1.6 Diagrama de frecuencia contra potencia (o diagrama de casa) de un generador síncrono en paralelo con un bus infinito .....	9
Figura 1.7 Generador conectado en paralelo con un sistema de potencia en operación.....	11
Figura 1.8 Diagrama de casa en el momento en que el generador 2 se conecta en paralelo con el sistema.....	11
Figura 1.9 Conexión de las tres lámparas para detectar la secuencia de fase. 13	
Figura 1.10 Diagrama fasorial de un generador síncrono .....	16
Figura 1.11 a) Flujo del rotor, estator y entrehierro b) Descomposición del flujo del entrehierro en eje directo y en eje en cuadratura .....	17
Figura 1.12 Determinación de la curva de capacidad de un generador síncrono a) Diagrama fasorial del generador b) Diagrama fasorial del generador con unidades de potencia correspondiente .....	18
Figura 1.13 Curva de capacidad del generador síncrono.....	19
Figura 2.1 Diagrama de bloques del módulo motor-generador .....	24
Figura 2.2 Representación estructural del módulo motor-generador .....	25
Figura 2.3 Dimensiones del ángulo de hierro .....	26
Figura 2.4 a) Primer tipo de tubo rectangular b) Segundo tipo de tubo rectangular .....	26
Figura 2.5 Dimensiones de la estructura base .....	27
Figura 2.6 a) Cavidad del acople para el generador b) Cavidad para el motor principal.....	27
Figura 2.7 Diseño del gabinete de control .....	28
Figura 2.8 Circuito de control y fuerza del módulo motor-generador primario..	29

Figura 2.9 Representación gráfica del módulo motor-generador con sus partes principales .....	29
Figura 2.10 Dimensiones del generador síncrono en milímetros .....	31
Figura 2.11 Representación gráfica del generador síncrono.....	31
Figura 2.12 Mantenimiento del rotor del generador.....	32
Figura 2.13 Mantenimiento de los cepillos y escobillas del generador.....	33
Figura 2.14 Mantenimiento del estator del generador .....	34
Figura 2.15 Mantenimiento de la carcasa del generador .....	34
Figura 2.16 Motor de inducción jaula de ardilla .....	35
Figura 2.17 Variador de velocidad Telemecanique altivar 31 M3X .....	35
Figura 2.18 Circuito del variador de frecuencia Telemecanique altivar 31 M3X36	
Figura 2.19 Contactor CHNT NXC-32 .....	36
Figura 2.20 Frecuencímetro y voltímetro analógicos.....	37
Figura 2.21 Representación del módulo motor-generador con sus partes complementarias .....	39
Figura 2.22 Fabricación de la estructura del módulo.....	40
Figura 2.23 Fabricación y montaje del acople .....	40
Figura 2.24 Nivelación del motor principal con respecto al generador síncrono .....	41
Figura 2.25 Puesta a punto del lugar del módulo .....	41
Figura 2.26 Construcción del tablero de control .....	42
Figura 2.27 Flujograma del generador síncrono suministrando potencia en red aislada.....	44
Figura 2.28 Flujograma de proceso de acoplamiento a la red del generador síncrono .....	46
Figura 3.1 Fuente de voltaje variable AC y terminales de conexión al tablero de control .....	49
Figura 3.2 Circuito con el generador conectado a una fuente de voltaje de excitación externa .....	49
Figura 3.3 Voltaje entregado por la fuente de voltaje externa .....	50
Figura 3.4 a) Conexión de 120V primera fase b) Conexión de 120V segunda fase c) Conexión de 240V fases juntas.....	51
Figura 3.5 a) Conexión de acoplamiento con la primera fase del generador b) Conexión de acoplamiento con la segunda fase del generador .....	52

Figura 3.6 Diagrama eléctrico del generador suministrando en red asilada.....	54
Figura 3.7 Mediciones de la carga conectada al generador operando en red asilada.....	54
Figura 3.8 Velocidad del motor primario con respecto a la potencia del generador .....	55
Figura 3.9 Señal de frecuencia en acoplamiento bifásico a) $\tau=1$ b) $\tau=2$ c) $\tau=3$ d) $\tau=4$ .....	56
Figura 3.10 Diagrama eléctrico del generador acoplado a la red barra infinita	57
Figura 3.11 a) Frecuencia de la red y del generador b) Diagrama de casa cuando el generador está conectado a barra infinita .....	58
Figura 3.12 a) Voltaje de excitación AC, voltajes de la red y del generador b) Diagrama de casa de los voltajes con respecto a la potencia aparente del sistema .....	59
Figura 3.13 a) Cumplimiento de los requerimientos de voltaje y frecuencia para el acoplamiento del generador con la red barra infinita b) Método para identificar la secuencia de fases iguales mediante la luz indicadora .....	60
Figura 3.14 Señal de frecuencia en acoplamiento monofásico a) $\tau=1$ b) $\tau=2$ c) $\tau=3$ d) $\tau=4$ .....	61
Figura 3.15 Triangulo de potencias medidas en la prueba acoplando el generador a la red de CIELE .....	62

## Índice de tablas

Tabla 1.1 Límites de la curva de capacidad del generador síncrono .....	14
Tabla 1.2 Protecciones por fallas internas .....	20
Tabla 1.3 Protecciones por fallas externas y condiciones anormales de operación .....	21
Tabla 2.1 Equipos y materiales imprescindibles del módulo motor-generador.	30
Tabla 2.2 Características del generador síncrono.....	30
Tabla 2.3 Materiales complementarios del módulo .....	37

## Resumen

En la etapa de generación de potencia en corriente alterna, la frecuencia indica el balance de la potencia, la calidad de frecuencia se ve afectada por la demanda de potencia activa por parte de la carga conectada. En parámetros de estabilidad en régimen permanente la frecuencia no varía e indica el balance de la potencia, resulta indispensable mantener su valor constante. Un sistema de alimentación funciona satisfactoriamente cuando la frecuencia y el voltaje del sistema son constantes o están sujetos a variaciones limitadas y controlados cuando se varían las cargas activas y reactivas. En el presente proyecto se implementa un módulo motor-generador eléctrico en el laboratorio de la carrera de Electricidad en la Universidad Técnica del Norte para análisis de parámetros en la etapa de generación de un sistema eléctrico de potencia. El módulo motor-generador demanda resolver la aparición de vibración al momento de operación, parámetros de acoplamiento con la red en estado estable, consumo del motor primario en el variador de frecuencia conectado en red aislada, parámetros de programación, con lo cual, se permite llevar a cabo pruebas específicas, eficaces y exitosas en sus distintas topologías de funcionamiento. Con el módulo operativo, se realizan pruebas de operación del generador; a velocidad de sincronismo generando 240 voltios entre fase- fase y 120 entre fase-neutro con una frecuencia de 60 Hz, conectando carga en los terminales del generador, operando en red aislada, así mismo, la prueba con el generador trabajando acoplado en barra infinita, el acoplamiento de una de las fases del generador a la red del laboratorio de máquinas eléctricas con una tensión nominal de 126 voltios y frecuencia de 60Hz.

Palabras clave: motor-generador, generación eléctrica, sincronización, generador, red eléctrica, generador síncrono.

## **Abstract**

In the AC power generation stage, the frequency indicates the power balance, the frequency quality is affected by the active power demand of the connected load. In steady-state stability parameters the frequency does not vary and indicates the power balance, it is essential to keep its value constant. A power system operates satisfactorily when the frequency and voltage of the system are constant or subject to limited and controlled variations when the active and reactive loads are varied. In this paper, an electric motor-generator module is implemented in the laboratory of the Electricity at the Técnica del Norte University to analyze parameters in the generation stage of an electric power system. In motor-generator module appearance of vibration in operation, parameters of coupling with the network in steady state, consumption of the primary motor in the frequency inverter connected in isolated network, programming parameters, it is possible to carry out specific, efficient, and successful tests in its different operating topologies. With the operating module, generator operation tests are performed; at synchronous speed generating 240 volts between phase-phase and 120 between phase-neutral with a frequency of 60 Hz, connecting load on the generator terminals, operating in isolated network, as well as the test with the generator working coupled in infinite bar, the coupling of one of the generator phases to the network of the electrical machines laboratory with a nominal voltage of 126 volts and frequency of 60Hz.

Keywords: motor-generator, electrical generation, synchronization, generator, electrical network, synchronous generator.

# INTRODUCCIÓN

## A.1. CONTEXTUALIZACIÓN

El uso de estrategias pedagógicas para el aprendizaje y enseñanza de carreras de ingeniería, han resultado de las necesidades que el docente y el estudiante requieren para el proceso de formación, y enfocándose a que el estudiante participe proactivamente, para ello, cada estrategia debe ser minuciosamente seleccionada, de esta manera, el principio para una buena enseñanza se ve representado en que estudiante este motivado, logrando que la enseñanza se convierta efectivamente en una actividad de aprendizaje. (Gerrero Hernández, Araque Gallardo, & Gallo Nieves, 2016)

Un módulo a escala es un recurso instruccional que sirve como herramienta de investigación, experimentación y aprendizaje, en el cual se presentan habilidades que facilitan el entendimiento y así el aprendizaje eficaz; en este tipo de enseñanza, adquirir conocimientos y destrezas se logra sin estar en contacto continuo con el docente. (Gerrero Hernández, Araque Gallardo, & Gallo Nieves, 2016)

La generación de energía eléctrica, en términos generales, equivale al cambio de alguna clase de energía, “no eléctrica”, como energía química, mecánica, térmica, luminosa en electricidad. (Universidad José Matias Delgado, 2015).

Los módulos o tableros de generación eléctrica de entrenamiento sirven para ejecutar pruebas que pueden ser enfocadas al estudio y análisis de sistemas eléctricos de potencia, particularmente, en la etapa de generación, gracias a esto se detectó la necesidad de realizar este trabajo, que facilitará el estudio de sistemas eléctricos de potencia en la carrera de Electricidad de la Universidad Técnica del Norte.

Un sistema eléctrico de generación tiene como finalidad suplir la demanda de potencia eléctrica, requerida por parte de los consumidores o el sistema de potencia en general, de forma continua y eficaz. Hay múltiples variables a tomar en cuenta en un sistema eléctrico de generación, como el nivel de voltaje, potencia inyectada, frecuencia del sistema y otros factores que deben

mantenerse dentro de un régimen aceptable basado en una norma para garantizar la calidad de energía generada y mantener el correcto funcionamiento de los elementos eléctricos o electrónicos que se conecten a la red eléctrica (Izquierdo Franco, 2002).

El análisis de flujo de potencia guía la planeación y el diseño de expansión de las redes eléctricas, y también ayuda en la deducción de condiciones de operación más aceptables para los sistemas existentes. (Izquierdo Franco, 2002)

El presente proyector estará dividido en tres capítulos donde se llevará a cabo: el marco teórico, construcción del módulo de generación eléctrica para la emulación de un sistema eléctrico de potencia en el laboratorio y la validación de funcionamiento en estado estable y acoplado a la red.

## **A.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la etapa de generación de potencia en corriente alterna, en parámetros de estabilidad en régimen permanente la frecuencia no varía e indica el balance de la potencia, la calidad de frecuencia se ve afectada por la demanda de potencia activa por parte de la carga conectada y resulta indispensable mantener su valor constante.

Un sistema de alimentación funciona satisfactoriamente cuando la frecuencia y el voltaje del sistema son constantes o están sujetos a variaciones limitadas y controladas cuando se varían las cargas activas y reactivas.

El análisis de sistemas de generación de potencia eléctrica es de gran importancia en la planeación y en el diseño de la expansión futura de los sistemas eléctricos, así como en la determinación de las mejores condiciones de operación de los sistemas existentes.

## **A.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cómo implementar un módulo motor-generador eléctrico en el laboratorio de la carrera de Electricidad en la Universidad Técnica del Norte?

#### **A.4. OBJETIVO GENERAL**

Implementar un módulo motor-generador eléctrico en el laboratorio de la carrera de Electricidad en la Universidad Técnica del Norte para análisis de parámetros en la etapa de generación de un sistema eléctrico de potencia.

#### **A.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar los diferentes modelos de generación eléctrica, su funcionamiento en estado estable y parámetros necesarios para la construcción del módulo de generación.
- Construir un módulo emulador de generación eléctrica con acoplamiento a la red de CIELE.
- Validar el funcionamiento del módulo de generación eléctrica para comprobar su comportamiento en estado estable y acoplado a una red eléctrica.

#### **A.6. JUSTIFICACIÓN**

En el plan maestro de electrificación de Ecuador (CONELEC, 2013) se plantea que “la clave es asegurar el autoabastecimiento energético, maximizando el aprovechamiento de los recursos renovables que cuenta el país. El plan de expansión es elaborado con una visión integral de país, priorizando la atención de la demanda, cuya proyección incluye a más del crecimiento tendencial del consumo, la incorporación de importantes cargas al sistema, el cambio de la matriz energética y la necesidad de interconectar el sector petrolero con el Sistema Nacional de Transmisión”.

Debido a lo antes citado, el presente proyecto está encaminado a plantear una herramienta de emulación de un sistema de generación eléctrico para el estudio, investigación y de potencia.

Como consecuencia del aumento progresivo en la demanda de consumo energético ecuatoriana es imperativo que existan herramientas de investigación y estudio de sistemas de generación eléctrica que emulen los sistemas reales,

facilitando el entendimiento sin la necesidad de invertir relativamente demasiados recursos.

Las herramientas de estudio para los sistemas de generación eléctrica a escala permiten obtener información relevante del sistema eléctrico, información de distintas etapas que conforman un sistema eléctrico de potencia como elementos que generan, transforman, transportan, distribuyen y consumen electricidad, además de los que protegen y controlan el sistema. En un módulo se está en contacto directo con los términos tratados teóricamente de un sistema eléctrico de potencia, medir, diferenciar y comparar directamente del sistema y asegurar que los datos calculados como los medios son correctos, medir voltajes, frecuencia, potencias de generación, así como también perturbaciones que suelen ser ocasionadas en un sistema de generación real.

El presente proyecto es un tema que contribuye al estudio y desarrollo académico e investigativo apropiado, sobre la etapa de generación para un sistema de potencia, existe una inmensa cantidad de información científica que aporta a la elaboración del análisis del estado del arte del proyecto.

La tecnología para emplearse cuenta con características y condiciones técnicas que aportarán al cumplimiento de los objetivos del proyecto. Se puede establecer que el diseño e implementación del módulo de generación para un sistema de potencia a escala es técnicamente viable, por la accesibilidad a los materiales que conforman el equipo motor-generador e instrumentos de medición.

## **A.7. ALCANCE**

Con base en el sustento teórico obtenido, se implantará un módulo motor-generador que permitirá el estudio y análisis de la etapa de generación eléctrica en un sistema de potencia.

En el módulo motor-generador se trabajará en sistema por unidad, simulando un sistema real con una potencia dada por las características del generador síncrono, asimismo la impedancia estará estipulada en valores por unidad reflejo a valores reales.

El presente proyecto estará limitado a las siguientes consideraciones:

- Inyección de potencias de generación
- Voltajes de generación
- Frecuencias de generación
- Perdidas en la etapa de generación
- Medición de magnitudes

El sistema de generación trabajará en estado estable con opción de acoplamiento a un sistema eléctrico de potencia para inyección de potencia extra. El suministro de potencia será controlado por la velocidad de un motor primario impulsor y demás dispositivos necesarios para la realización de un acoplamiento con un sistema de barra infinita, con lo que se permitirá aumentar el panorama de estudio de flujos de potencia como en sistemas reales o aislados.

Se validará el proyecto en carácter práctico sobre la propuesta, para ello se planteará un análisis para verificación de su comportamiento en régimen de estado estable, su caracterización y funcionamiento acoplado a la red del laboratorio de la carrera de Electricidad, esta comprobación se la hará mediante el método experimental comparando las aplicaciones del sistema de generación en casos prácticos con las características previstas en el fundamento teórico.

# CAPÍTULO I

La energía eléctrica es primordial para la evolución y desarrollo de la especie humana, debido a ello, su disponibilidad y la utilización adecuada de los recursos energéticos son de vital importancia para el futuro de las economías mundiales. La demanda energética día con día sigue creciendo a un ritmo exponencial. Y según López-Rey García-Rojas, (2016) la energía eléctrica para el 2040, representará el 25% del consumo energético total en el mundo, además, las nuevas aceptaciones con respecto al cambio climático hoy en día muestran un modelo energético con menor emisiones de CO<sub>2</sub>.

En este capítulo se presenta el fundamento teórico, descripción y características del generador síncrono, modelos de la máquina síncrona, formas de funcionamiento del generador síncrono y una introducción al módulo motor-generador.

## 1.1. Máquina síncrona

La máquina síncrona está conformada por materiales ferromagnéticos, el estator con forma de cilindro con comportamiento estacionario tiene aberturas en donde se encuentra el devanado de armadura, mediante estas bobinas se provee a la carga de corriente generada necesaria. El rotor es aquel que gira en el eje dentro del estator (Romero Guavita & Núñez Eguis, 2017).

Las máquinas síncronas funcionan a velocidad de sincronismo, los bobinados fijos en el estator se conectan eléctricamente a la carga conectada trabajando en corriente alterna, con una fuente separada de excitación de corriente continua, dicha fuente está conectada a los devanados de campo al eje de rotación de la máquina. Los enlaces de flujo magnetomotriz del rotor y los bobinados estatóricos permiten que el motor funcione a velocidad sincrónica (Ortiz Boada & Viteri Navarrete, 2014), es decir que su velocidad es proporcional a la frecuencia de la corriente que circula por los devanados del estator, y al hacer circular corriente continua en el rotor se forma un campo magnético se produce movimiento en el rotor que girar a la misma velocidad que el campo producido en el estator (Valenzuela Santillán, 2013).

## 1.2. Generadores síncronos

Los generadores síncronos son máquinas que transforman la energía mecánica en energía eléctrica que pueden funcionar de manera aislada u operar al estar conectado eléctricamente a un sistema de gran potencia eléctrica (Arias Calle & Bravo López, 2016).

Los generadores síncronos se caracterizan por tener el núcleo estatórico laminado y con ranuras, que albergan un devanado que genera potencia de corriente alterna, este devanado puede ser trifásico, bifásico, o monofásico, y un rotor excitado por corriente continua, excitación magnética o de saliencia variable. Contiene dos campos móviles (el del estator y del rotor) en situación de reposo relativo que interactúan para producir un par sin ondulaciones, la velocidad está rígidamente ligada a la frecuencia del estator, porque el campo magnético producido por el rotor es de corriente continua y típicamente heteropolar en los generadores síncronos, trabajando con el principio de inducción electromagnética donde existe un movimiento relativo entre los bobinados del estator y los devanados del rotor, este movimiento relativo genera un potencial eléctrico alterno en los conductores eléctricos de la armadura, dicho potencial tiene una forma de onda senoidal por el recorrido perimetral de los polos en el núcleo del estator (Boldea, 2016) (Arias Calle & Bravo López, 2016).

Un generador síncrono se arranca inicialmente en vacío, la regulación se la realiza variando la velocidad del motor que proporciona la potencia mecánica. El generador se sincroniza con la red ajustando previamente la máquina a la red, igualando las tensiones eficaces, las frecuencias, los ángulos de desfases y el sentido de rotación o secuencia de fases. Los generadores síncronos poseen la desventaja de que necesitan un circuito extra que le brinde la excitación al generador para poder arrancar, lo que supone más cantidad y complejidad de equipos (Rodríguez Pozueta M. A., 2014).

Los generadores síncronos presentan características generales y se deben cumplir ciertas exigencias eléctricas y mecánicas para un correcto funcionamiento. Los generadores síncronos suministran potencia activa y reactiva a la red, proporcionan potencia con un factor de potencia específico, en la actualidad se fija la potencia nominal

con un factor de potencia alto en rangos de 0.8 y 0.9 para grandes unidades de generación (Fernández Diego & Robles Díaz, 2012).

La capacidad de sobrecarga de los generadores síncronos en centrales es del orden del 15-20% de la potencia nominal. La relación de cortocircuito en aquellos generadores de velocidad alta está comprendida entre 0,8-1,1. En los generadores de velocidad baja dicha relación se encuentra entre 1,1-1,3. La relación de cortocircuito es la relación entre la corriente de excitación nominal y la corriente de excitación que se necesita para suministrar una corriente de cortocircuito igual a la corriente nominal en el estator (Fernández Diego & Robles Díaz, 2012).

La influencia de la relación de cortocircuito interviene en el dimensionamiento de la máquina, si tenemos un diámetro de rotor específico y si la relación de cortocircuito decrece, indicará una relación muy sensible de la longitud del hierro, lo que quiere decir un menor peso del generador al igual que un menor costo de adquisición y montaje (Boldea, 2016).

La reactancia síncrona está en función de la relación que existe entre la corriente de excitación y la corriente de campo. El valor de la densidad periférica del generador síncrono depende del calentamiento admisible y de que tan pura sea la onda tensión senoidal formada en el entrehierro, se debe tomar el valor de relación de cortocircuito para comprobar la estabilidad estática de la máquina (Fernández Diego & Robles Díaz, 2012).

La reactancia transitoria para evaluar la estabilidad dinámica de las máquinas síncronas, su modo de comportarse cuando se producen variaciones en la carga conectada, o como varía la corriente que desarrolla la máquina cuando se produce una falla, en un generador síncrono la estabilidad dinámica es inversamente proporcional a la reactancia de fugas, la reducción de la reactancia de fugas se consigue disminuyendo la densidad periférica de la corriente del estator. En el generador síncrono la suma de las reactancias de fuga del transformador y la reactancia transitoria también influyen en la estabilidad dinámica (Rodríguez Pozueta M. A., 2014).

### 1.2.1. Modelos del generador síncrono

En estudio del comportamiento del generador síncrono se considera dos ejes ficticios; eje directo y eje de cuadratura, que giran con el rotor a la velocidad sincrónica como se muestra en la Figura 1.1. El eje directo se muestra en la dirección norte-sur del rotor, origen en el centro magnético y en dirección hacia el norte. El eje de cuadratura comparte el mismo origen que el anterior y se dirige perpendicular a éste (Orjuela Tirano & Cortés Bolívar, 2020)

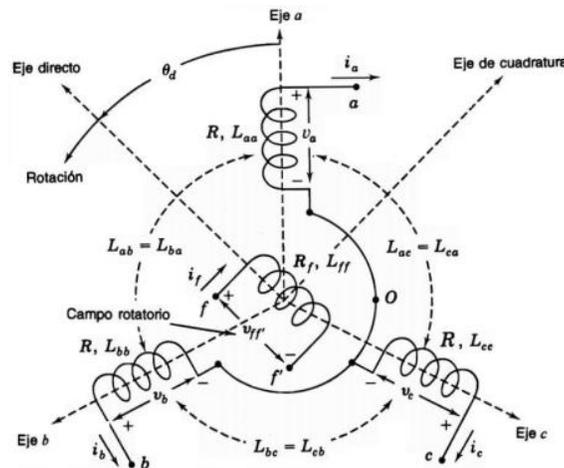


Figura 0.1 Diagrama de fases en un generador síncrono trifásico

Fuente: (Orjuela Tirano & Cortés Bolívar, 2020)

Estableciendo estos parámetros es posible llegar a un circuito eléctrico equivalente, para definir el comportamiento del generador síncrono (Orjuela Tirano & Cortés Bolívar, 2020).

#### 1.2.1.1. Modelo estacionario

También conocido como modelo estático, comprende las variables y los ángulos de fase de los voltajes de las barras de la red eléctrica. Los estimadores de estado estacionario tradicionales (SSE, Static State Estimator) encuentran el valor más probable del estado estacionario actual del sistema, a partir de las mediciones obtenidas del sistema SCADA y del modelo del sistema de estado estático. Las mediciones del sistema SCADA son de los flujos de potencia activa, reactiva, de voltajes y corrientes en las

barras del sistema. El conjunto de mediciones es obtenido, de una manera no sincronizada en intervalos de uno a cuatro segundos, aproximadamente (Ninazunta Anaguano, 2019).

En este modelo se asume invariable en el tiempo, por lo que en el sistema se ignora el comportamiento dinámico de la mayoría de los componentes de la red eléctrica, interacciones electromecánicas entre los generadores del sistema y características dinámicas de la carga o los dispositivos de control (Ninazunta Anaguano, 2019).

El sistema o circuito eléctrico que se muestra en la Figura 1.2 para cada fase, una fuente de tensión conectada en serie con una impedancia RL, que muestra la impedancia interna de la máquina. La magnitud de R puede ser cero, y el valor L debe ser positivo (Orjuela Tirano & Cortés Bolívar, 2020).

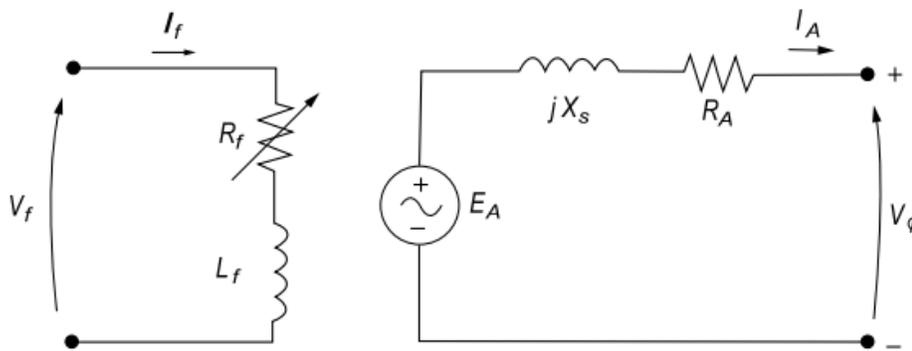


Figura 0.2 Circuito equivalente por fase de un generador síncrono

Fuente: (Romero Guavita & Núñez Eguis, 2017)

Hay que tener en cuenta que, para un generador trifásico, las tres fases se pueden conectar en delta o en estrella, y las relaciones de tensiones de fase y de línea vienen respectivamente dadas por la forma de conexión (Orjuela Tirano & Cortés Bolívar, 2020).

### 1.2.1.2. Modelo dinámico

El modelo dinámico del generador síncrono está dado por las interacciones electromagnéticas de los devanados de la máquina y la respuesta mecánica del rotor (Ninazunta Anaguano, 2019).

Existe el modelo dinámico simplificado y el detallado, el simplificado modela las características eléctricas y mecánicas del generador eléctrico, es eficaz para representar algunas características de la dinámica del generador, y el modelo detallado está expresado por el modelo d-q como se muestra en la Figura 1.3, el cual elimina la dependencia de la inductancia en la posición del rotor que mejora la interpretación y el funcionamiento del modelo de la máquina síncrona (Orjuela Tirano & Cortés Bolívar, 2020).

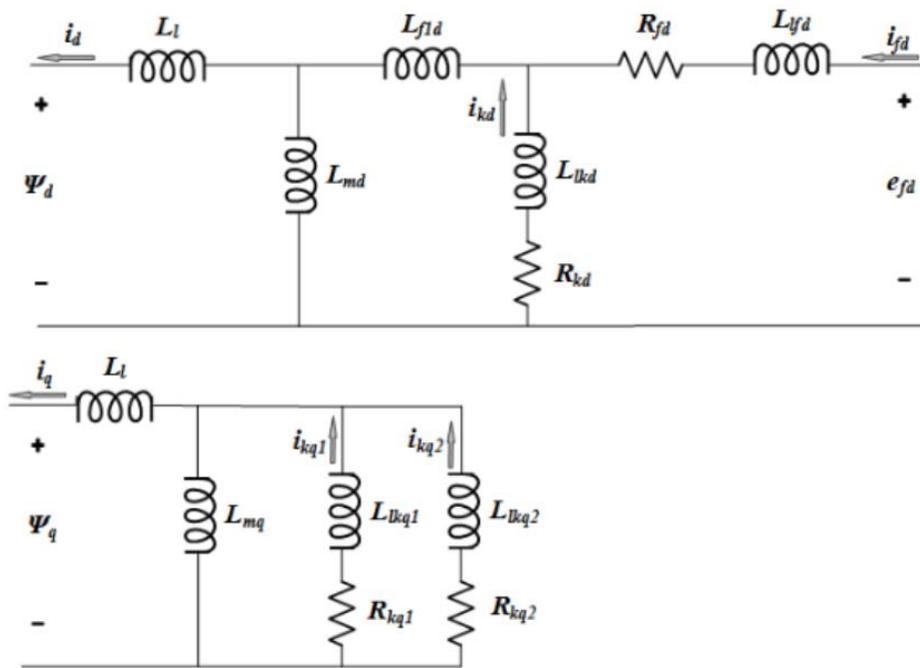


Figura 0.3 Circuito equivalente del generador síncrono en el marco dq0

Fuente: (Orjuela Tirano & Cortés Bolívar, 2020).

En el circuito equivalente del modelo dinámico detallado todos los parámetros del rotor y las cantidades eléctricas están vistos desde el estator y se identifican con variables separadas.

El modelo de dos ejes desprecia la dinámica de las variables de los ejes locales d-q suponiendo que son lo bastante rápidas para que las constantes de tiempo subtransitorias de circuito abierto sean nulas, y se mantienen las variables de voltaje interno d-q en el modelo. Se considera al modelo de dos ejes como un modelo transitorio y su estructura tiene un circuito de rotor por cada eje, este modelo se representa en

parámetros estándar transitorios y de estado estacionario de la máquina. (Ninazunta Anaguano, 2019).

En este submodelo del modelo de dos ejes, para los ejes locales d-q de la máquina se utiliza la transformación d-q a R-I para expresar las variables de corriente transitoria en términos de las componentes R-I del fasor de la corriente terminal de la máquina (Tebiania, 2014).

### 1.3. Operación del generador síncrono

Un generador síncrono puede trabajar de tres formas distintas dependiendo de cómo se acople; acoplamiento del generador síncrono a una red de barra infinita, generador síncrono en red aislada, acoplado a un generador con potencia semejante en paralelo.

#### 1.3.1. Funcionamiento de generador síncrono en red aislada

En este caso solo el alternador síncrono está suministrando potencia a una carga eléctrica.

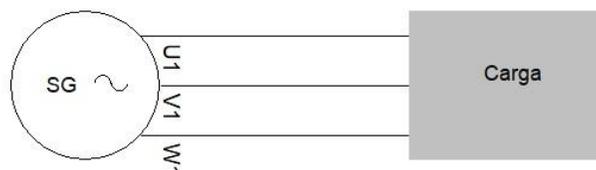


Figura 0.4 Un solo generador que alimenta una carga

Fuente: Autor

Cuando el generador síncrono está funcionando en red aislada el variador de velocidad que controla al motor que impulsa al generador permite ajustar la frecuencia, mientras que al regular la corriente del inductor se puede encontrar el valor eficaz de potencia suministrada. Las potencias, activa, reactiva y el factor de potencia varían en función de la carga eléctrica conectada al alternador. La forma de funcionamiento de un

generador síncrono en red aislada depende de características de exterior y de regulación (Rodríguez Pozuela, 2015)

Trabajar con un generador en red aislada presenta ciertas características:

- La frecuencia ( $f$ ) y la tensión ( $V$ ) no se pueden regular, varían dependiendo de la red
- La red puede proporcionar o consumir toda la potencia activa ( $P$ ) y toda la reactiva ( $Q$ ) que se desee.
- La potencia activa ( $P$ ) se controla mediante el regulador del motor.
- La potencia reactiva ( $Q$ ) y el factor de potencia ( $\cos \Phi$ ) se controla con la corriente de excitación ( $I_e$ ).

### **1.3.2. Funcionamiento del generador síncrono acoplado a una red de barra infinita**

Una red de barra o de potencia infinita es aquella con una potencia demasiado grande como para comprarla con la de la maquina síncrona acoplada, por lo que la red permanece invariable ante cualquier cambio que se realice en los reguladores del motor de accionamiento del alternador. En el momento del acoplamiento a la red de potencia infinita los valores instantáneos de las tensiones del generador y de la red deben ser iguales (Rodríguez Pozueta M. A., 2014).

Para que el generador síncrono pueda acoplarse a una red barra infinita se den cumplir estos requerimientos:

- 1) Igualdad de valores eficaces
- 2) Igualdad de frecuencias
- 3) Igualdad de ángulos de fase
- 4) Igualdad en la secuencia de fases

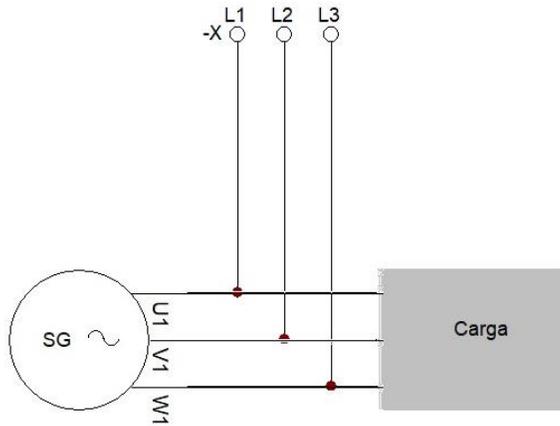


Figura 0.5 Generador síncrono que opera en paralelo con un bus infinito

Fuente: Autor

Al conectar un generador síncrono en paralelo con un sistema de gran potencia, las terminales de salida están conectadas entre sí, por lo que la frecuencia y voltaje de salida deben ser iguales (Chapman, 2012)..

Las características de frecuencia-potencia real y de potencia reactiva-voltaje de un generador operando conectado a una red barra infinita se representan en una gráfica espalda con espalda, con un eje vertical, gráfica llamada diagrama de casa como se muestra en la Figura 1.6.

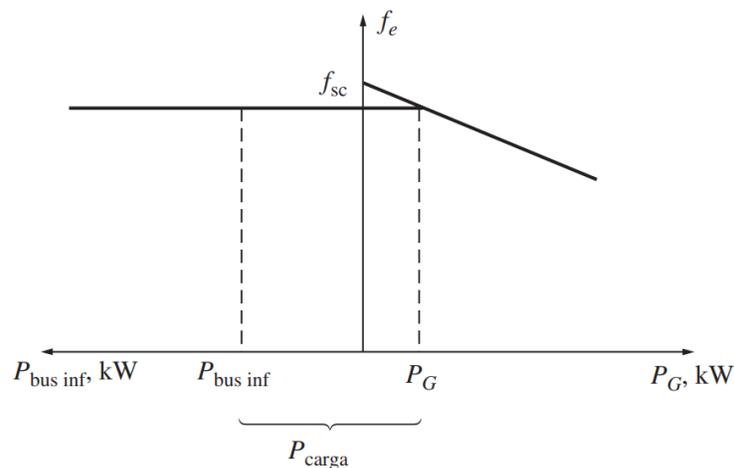


Figura 0.6 Diagrama de frecuencia contra potencia (o diagrama de casa) de un generador síncrono en paralelo con un bus infinito

Fuente: (Chapman, 2012)

La potencia de la barra infinita se mantiene debido a que es mucho más grande que la del generador conectado, por lo que la barra infinita tiene la capacidad de absorber

o suministrar toda la potencia activa (P) o reactiva (Q) que el generador suministre o demande, respectivamente (Rodríguez Pozueta M. A., 2014).

El último requerimiento del proceso de acoplamiento entre fases, se explica detalladamente en la sección 1.3.4. en el que la frecuencia de la barra infinita o generador en paralelo y la del generador alcanzan sincronismo y pueden entrar al sistema eléctrico de potencia, se verifica cuando se pone en marcha el alternador por primera vez y no hace falta volver a comprobarla. Las demás condiciones hay que verificarlas cada vez que se realiza la maniobra de acoplamiento del alternador a la red y para ello se necesitan aparatos de medida específicos. (Rodríguez Pozueta M. A., 2014).

Trabajar con un generador acoplado a una red de barra infinita presenta ciertas características:

- La frecuencia (f) se regula con la velocidad (n)
- La tensión (V) se regula mediante la corriente de excitación ( $I_e$ )
- Las potencias activa y reactiva (P)(Q), y factor de potencia ( $\cos \Phi$ ) no se pueden controlar y dependen de la carga conectada

### **1.3.3. Funcionamiento del generador síncrono acoplado a un alternador en paralelo con potencia semejante.**

La operación de dos o más alternadores en paralelo presenta una clara ventaja con respecto a la operación del generador aislado debido a la disponibilidad. Cuando los generadores están acoplados, la distribución de carga debe equilibrarse, y dependen de los ajustes de voltaje y frecuencia en cada uno (Ramírez Medina & Sánchez Barroso, 2012).

Con el ajuste de los reguladores que controlan los dos alternadores se puede controlar, el reparto de potencia activa entre las dos máquinas y la frecuencia con la que está trabajando el sistema. (Rodríguez Pozueta M. A., 2014).

Los voltajes en los terminales de cada generador deben ser iguales y en cuyo caso también deben coincidir con la barra de carga, eso quiere decir que los valores RMS de voltaje deben concordar y estar alineados en secuencia de fases.

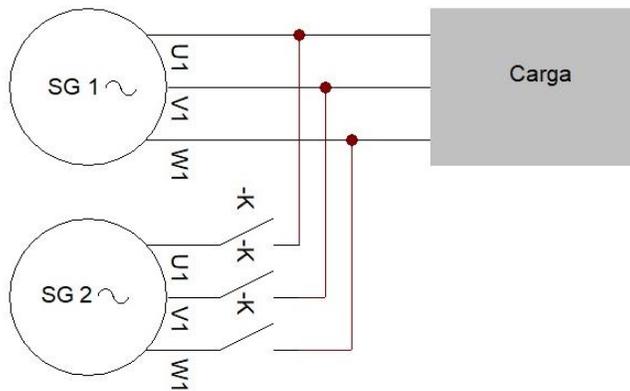


Figura 0.7 Generador conectado en paralelo con un sistema de potencia en operación

Fuente: Autor

Los voltajes y secuencias de fases de los generadores SG1 y el SG2 coinciden para que el -K se pueda cerrar. Cuando un generador opera en paralelo con otro generador del mismo tamaño, la restricción básica es que la suma de las potencias real y reactiva que suministran los dos generadores deben ser iguales a la P y Q demandadas por la carga. La frecuencia del sistema ni tampoco la potencia de un generador están restringidas a ser constantes.

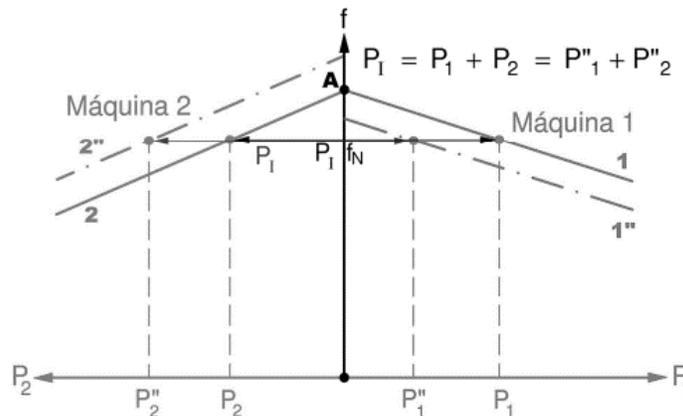


Figura 0.8 Diagrama de carga en el momento en que el generador 2 se conecta en paralelo con el sistema

Fuente: (Rodríguez Pozueta M. A., 2014)

Para modificar el suministro de la potencia activa entre ambos generadores se desplaza verticalmente sus curvas de estatismo mediante la regulación secundaria de los reguladores. Inicialmente los generadores tienen frecuencias de vacío iguales y suministran la potencia activa total  $P_1$  a la frecuencia asignada frecuencia nominal. Las

potencias activas de los alternadores son, respectivamente,  $P_1$  y  $P_2$  y sus curvas de estatismo son 1 y 2 (Rodríguez Pozueta M. A., 2014).

Trabajar con un generador acoplado a otro generador de potencia semejante en paralelo presenta ciertas características:

- La frecuencia ( $f$ ) y el reparto de potencia activa ( $P$ ) entre los dos alternadores se controla mediante los reguladores de los motores de ambas maquinas.
- La tensión ( $V$ ) y el reparto de la potencia reactiva ( $Q$ ) entre ambos alternadores se ajusta mediante los reguladores de excitación de ambas maquinas.
- Las potencias totales activa ( $P$ ) y reactiva ( $Q$ ) no se controlan, dependen de la carga que se conecte al conjunto de los dos alternadores en paralelo.

#### **1.3.4. Sincronización del generador síncrono**

Las características que ofrece la sincronización del generador síncrono permiten que varios generadores puedan suministrar más potencia a una sola carga o a la red, al contar con mayor capacidad de generadores conectados se incrementa la confiabilidad del sistema, en un sistema que va incrementando carga se añade generadores con el fin de suplir la demanda (Valenzuela Santillán, 2013).

En el momento del acoplamiento a la red de potencia infinita o con generadores en paralelo, los valores de las tensiones RMS de los generadores y de la red deben ser iguales (Rodríguez Pozueta M. A., 2014).

Los valores de voltaje de línea de los generadores deben ser semejantes, no debe haber diferencia entre voltajes y entre fases ya que, caso contrario se producirá un flujo de corriente relativamente alto que daña al generador, para igualar el voltaje de salida del generador con respecto al de la red, se varia la corriente campo. (Valenzuela Santillán, 2013).

La frecuencia en todo el sistema debe ser igual con el fin de que no se produzcan transitorios de potencia, que causan deterioro y la disminución de la vida útil de los generadores. Para variar la frecuencia se altera la velocidad de la maquina motriz y se visualiza por medio del frecuencímetro (Valenzuela Santillán, 2013).

La secuencia de fases del sistema está dada por la aparición de los picos de cada fase de los generadores del sistema de generación. La comprobación de las secuencias de fase se las realiza por medio del método de las tres lámparas.

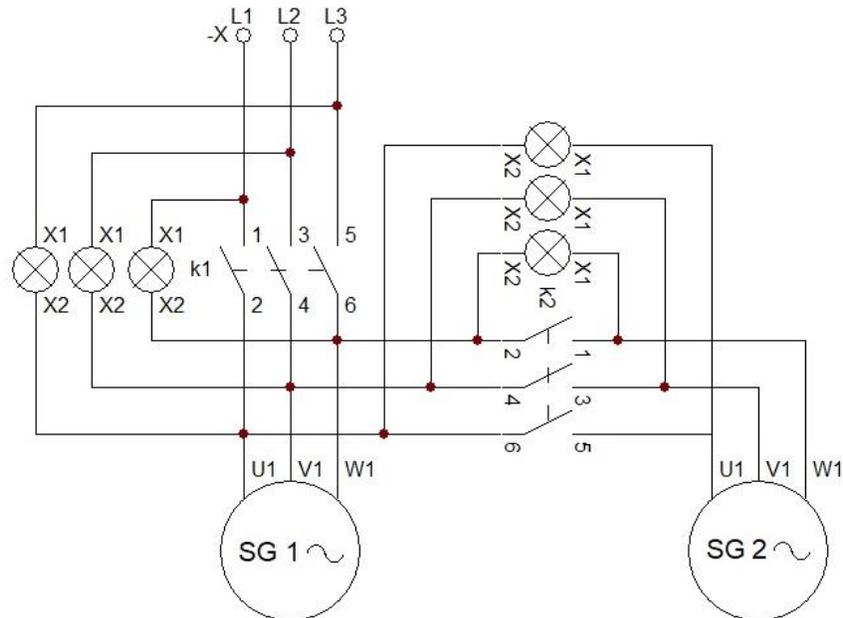


Figura 0.9 Conexión de las tres lámparas para detectar la secuencia de fase.

Fuente: Autor

Las tres lámparas colocadas encienden y apagan en función de la velocidad; cuanto más rápida la intermitencia de las luces, las frecuencias se acercan al origen una de la otra, la de los alternadores y la red. La luz se detiene y apaga cuando ambas frecuencias están en fase. El orden en el que la luz enciende indica cuál de estas frecuencias es mayor (Rodríguez Pozueta M. A., 2014).

Al sincronizar el generador síncrono es importante mencionar que es posible la necesidad de contar con instrumentos de medición específicos como el sincronoscopio y el transformador de sincronización especial. El sincronoscopio permite interpretar mediciones de desfase existentes entre dos sistemas, están dispuestos con una aguja giratoria que indica si la máquina está en retraso o adelanto con respecto a la referencia conectada. Un transformador sincronizador especial está construido con tres bobinados, dos de ellos laterales y uno central, el devanado primario se conecta a el sistema de referencia, el devanado central a una luz indicadora y finalmente el devanado secundario

se conecta a el generador entrante, cuando el voltaje del generador síncrono que quiere acoplarse está en fase con el de la referencia, se neutralizan los bobinados laterales con respecto a la bobina central, lo que apagara la lampara, si existe algún flujo en este devanado la lampara estará encendida. (Valenzuela Santillán, 2013)..

### 1.3.5. Curva de capacidad del generador síncrono

Según Chimarro Alomoto, (2019) las curvas de capacidad muestran las condiciones de operación normal de una unidad de generación, por lo general estas curvas son proporcionadas por el fabricante o desarrolladas con los parámetros eléctricos y mecánicos del generador. El principal objetivo de las curvas de capacidad es conocer las restricciones para establecer una generación segura de potencia en diferentes escenarios de operación.

La demanda de energía no es constante, los requerimientos de energía activa (P) y reactiva (Q) en los terminales de salida del generador son variables, debido a esto el punto de operación de las potencias (P, Q) se varía constantemente. Los límites de operación del generador permiten que el generador opere dentro de parámetros seguros (Arias Calle & Bravo López, 2016).

En el análisis de las curvas de capacidad se emplea el diagrama fasorial del generador de polos salientes quien representa los fasores de voltaje y de corriente generada en el alternador sincrónico. A partir del diagrama fasorial se obtienen las relaciones necesarias para establecer los parámetros o límites de capacidad del generador (Chimarro Alomoto, 2019).

Para Arias Calle & Bravo López, (2016) los límites de relevancia para construir la curva de capacidad del generador síncrono son los siguientes.

Tabla 0.1 Límites de la curva de capacidad del generador síncrono

Límite	Descripción	Fuente
<b>Corriente de armadura</b>	La corriente máxima aceptable en los devanados de armadura impuesta por la relación de	(Gallego Rendón, Escobar

	temperatura y vida útil del aislamiento de los conductores, en caso de que el generador esté operando más allá de este límite se producirá sobrecalentamiento de los bobinados de excitación	Zuluaga, & Granda Echeverri, 2016)
<b>Límite por corriente máxima de campo</b>	Este límite viene dado por la temperatura máxima de operación ya que se presenta el efecto Joule en los devanados del rotor por la resistencia que presenta al paso de corriente a través de él, la corriente máxima que circula no debe ser superior al límite	(Arias Calle & Bravo López, 2016)
<b>Límite por corriente mínima de campo</b>	Este límite es importante ya que la corriente de excitación no debe ser menor que el valor mínimo debido a que está relacionada con el torque magnético y este a su vez mantiene la estabilidad del generador	(Arias Calle & Bravo López, 2016)
<b>Límite por calentamiento localizado en el núcleo de hierro del estator</b>	Este límite existe debido a las corrientes parasitas que se producen en el estator y se las mitiga o controla para que estén en los rangos de estabilidad laminando el núcleo para reducir la superficie total que cruza el flujo magnético	(Arias Calle & Bravo López, 2016)
<b>Límite de estabilidad en</b>	Este límite se establece a partir del ángulo máximo que existe	(Gallego Rendón,

<b>estado estable</b>	entre el voltaje de inducción y el que existe en las terminales del generador. El ángulo de voltaje inducido está asociado con la potencia activa entregada por la máquina	Escobar Zuluaga, & Granda Echeverri, 2016)
-----------------------	--	--

Fuente: Autor

La base para la construcción de la curva de capacidad de generador es el diagrama fasorial, en este diagrama se tiene como referencia a la tensión en los terminales de salida del generador  $V_t$ , la misma que es por acuerdo constante.

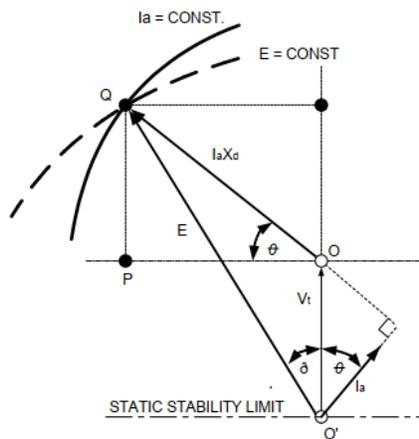


Figura 0.10 Diagrama fasorial de un generador síncrono

Fuente: (Rodríguez Chicaiza, 2008)

En el diagrama anterior por simplificación, la resistencia de armadura y el efecto de saturación se consideran un valor constante y no saturado para la reactancia sincrónica  $X_d$ . Se asume que el generador está conectado en barra infinita. El voltaje de los terminales  $V_t$  y la corriente de armadura  $I_a$  con un ángulo de fase, la fuerza electromotriz  $E$  se obtiene mediante la resta de reacción de armadura  $I_a X_d$  a  $V_t$  considerando que  $I_a X_d$  se encuentra perpendicular a  $I_a$ . Para una salida de potencia reactiva constante,  $I_a$  es constante y su lugar es un círculo con centro  $O$  al final el fasor de voltaje  $V_t$ . Excitación constante quiere decir que el lugar de  $E$  también es un círculo con centro  $O$ . El ángulo que forma  $E$  y  $V_t$  es el ángulo de potencia (Rodríguez Chicaiza, 2008)

Al momento de construir la curva de capacidad se deben tener en cuenta los siguientes límites:

2. Excitación contante
3. Corriente de armadura constante
4. Potencia activa constante
5. Potencia reactiva constante
6. Factor de potencia constante

Al descomponer la corriente ( $I$ ) en corriente de eje directo ( $I_d$ ) y corriente de eje en cuadratura ( $I_q$ ). En el diagrama anterior se muestra el fasor de referencia como voltaje terminal. El ángulo que forma el voltaje terminal y la fuerza electromotriz se denomina ángulo de transferencia de potencia ( $\delta$ ) y es directamente proporcional a la carga aplicada al generador. (Chimarro Alomoto, 2019)

Las componentes: eje directo y eje en cuadratura forman el diagrama para facilitar el análisis ya que los dos ejes construyen un ángulo de  $90^\circ$ ; debido a ello, se puede analizar el comportamiento en cada uno de los ejes por separado.

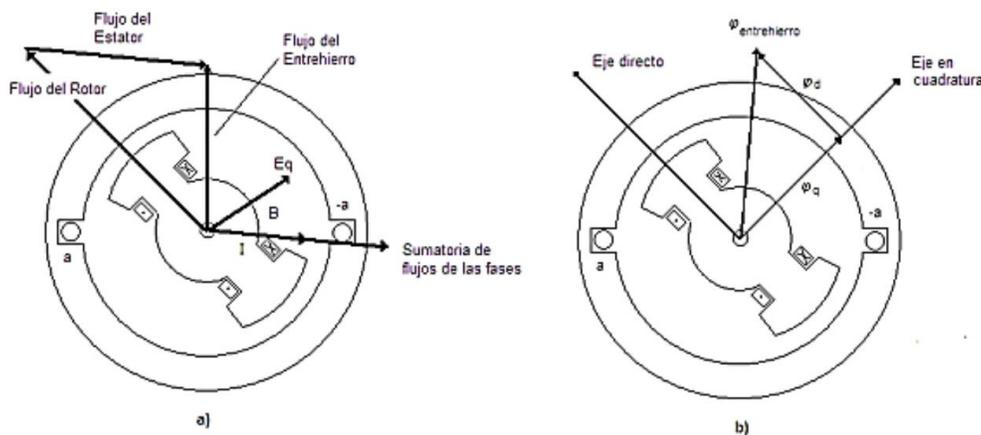


Figura 0.11 a) Flujo del rotor, estator y entrehierro b) Descomposición del flujo del entrehierro en eje directo y en eje en cuadratura

Fuente: (Chimarro Alomoto, 2019)

El diagrama fasorial para un generador de polos salientes toma en cuenta que existe una dirección preferente de magnetización determinada por la saliencia polar ya que la reluctancia del entrehierro es apreciablemente menor en el sentido longitudinal de los polos.

Para poder expresar los límites del estator y rotor de un generador síncrono de forma gráfica se hace uso del diagrama de capacidad, un gráfico de la potencia compleja.

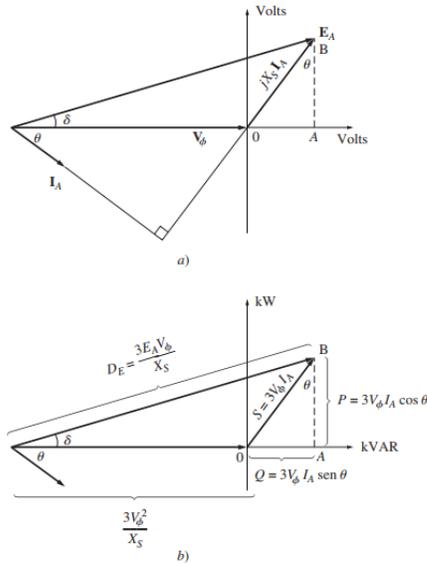


Figura 0.12 Determinación de la curva de capacidad de un generador síncrono a) Diagrama fasorial del generador b) Diagrama fasorial del generador con unidades de potencia correspondiente

Fuente: (Chapman, 2012)

El diagrama fasorial de un generador síncrono con un factor de potencia negativo y con voltaje nominal, los ejes tienen origen en la punta de voltaje de fase, el segmento vertical AB tiene una longitud de  $X_S I_A \cos \theta$  y el segmento OA tiene una longitud de  $X_S I_A \sin \theta$ .

La curva de capacidad resultante es el gráfico de la capacidad de potencia aparente (VA), a tensión nominal, utilizando la potencia activa (W) y la potencia reactiva (VAR) como los dos ejes principales. Las circunferencias trazadas con sus centros en el origen representan curvas de corriente del estator constante (Rodríguez Chicaiza, 2008).

Una curva de capacidad separa la región de funcionamiento permitido, dentro de la curva, de la región de funcionamiento prohibido, fuera de la curva.

En un gráfico x-y donde el eje x representa P y el eje y representa Q, si, como en el caso de una curva de capacidad de las máquinas, la tensión se mantiene constante (en

el valor nominal), entonces una circunferencia también representa una trayectoria de corriente constante.

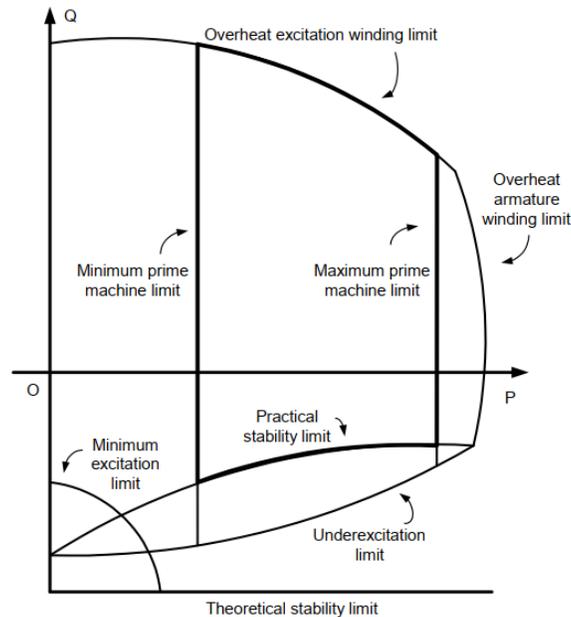


Figura 0.13 Curva de capacidad del generador síncrono

Fuente: (Rodríguez Chicaiza, 2008)

La curva de capacidad muestra cada uno de los límites ya mencionados, para este diagrama el límite de estabilidad es más restrictivo que el límite por sobrecalentamiento de los terminales de la armadura para el área de subestación (Rodríguez Chicaiza, 2008).

En el mismo gráfico, cualquier línea que comience en la intersección del eje representa un factor de potencia determinado. Las diferentes partes de la curva de capacidad están limitadas por diferentes componentes de la máquina. Hay una parte limitada por la capacidad del devanado de campo, una parte limitada por la capacidad del devanado del estator (la parte circular), y una parte limitada por el calentamiento del extremo del núcleo (Geoff Klempner, 2018).

Cualquier punto dentro los dos círculos es área de operación segura para el generador síncrono.

## 1.4. Sistema de protecciones para el generador síncrono

En cualquier tipo instalación eléctrica vigilada mediante un sistema de protección eléctrica diseñado para percibir las perturbaciones y variables que puedan alterar el estado del generador y su funcionamiento. Con el objetivo de que, al detectar una falla, el generador deberá desconectarse, sacándolo de la red para preservarlo o reducir los daños y contribuir a la estabilidad del sistema eléctrico de potencia.

Según la capacidad del generador, las funciones para proteger son variadas. Cada fabricante tiene distintos tipos de protecciones según la falla, quienes se basan en la relación entre el precio y la importancia del elemento protegido. Las perturbaciones o fallas en el sistema del generador se despejan mediante la actuación de funciones de protección del relé de protección, quien actúa sobre todas las fallas de índole eléctrico, mecánico o térmico que ocurran en el interior o exterior del generador. Debido a la variedad de fallas, los relés tienen funciones protección para fallas internas y externas según Tonato Muñoz, (2020) son las siguientes:

### Protección para fallas internas:

Tabla 0.2 Protecciones por fallas internas

<b>Función</b>	<b>Descripción</b>	<b>Dispositivo</b>
Protección contra diferencias longitudinal del generador	Esta protección se utiliza para proteger al generador de corto circuitos entre fases	87G
Protección de falla a tierra de devanados de estator	Esta protección protege al generador de corto circuitos entre fase y tierra de los devanados del estator	64E1/64E2
Protección de falla a tierra del devanado de campo	Esta función de protección protege al generador contra probable falla a tierra del devanado de campo	64R

Fuente: Adaptado de (Tonato Muñoz, 2020)

## Funciones para fallas externas y condiciones anormales de operación

Tabla 0.3 Protecciones por fallas externas y condiciones anormales de operación

<b>Función</b>	<b>Descripción</b>	<b>Dispositivo</b>
Protección de pérdida de excitación	Esta protección protege al generador contra probable pérdida de excitación, detectando un cambio de impedancia en los terminales del generador	<b>40</b>
Protección de sobrecorriente de secuencia negativa de generador	Esta protección protege al generador contra aparición de una sobrecorriente de secuencia negativa dependiendo del tiempo que dure la falla y magnitud	<b>46</b>
Protección de pérdida de sincronización del generador	Esta protección protege al generador contra posible pérdida de sincronización con el sistema eléctrico durante la operación del generador analizando la variación en la impedancia aparente como se ve en los terminales de los elementos del sistema	<b>78G</b>
Protección contra sobreexcitación.	Actúa en posible sobre excitación durante operación midiendo la magnitud de la tensión y frecuencia de los terminales del generador para establecer la relación y encontrar la magnitud de flujo que circula en el entrehierro	<b>24</b>
Protección de potencia inversa	Actúa cuando la energía fluye de la red al generador al calcular la potencia a partir de las lecturas de los TC's y TP's, con un retardo de tiempo se evita disparos que pueden ocurrir durante la oscilación cuando el generador se sincroniza con el sistema	<b>32</b>

Protección de sobretensión	Actúa cuando existe una sobretensión al medir la tensión en los terminales del generador	<b>59</b>
Protección de sobrecarga térmica del estator y rotor del generador	Actúa cuando existe elevadas temperaturas en el rotor y estator al monitorear la corriente de excitación, cuando esta excede el valor nominal se mide la duración y dispara cuando se alcance determinado ajuste	<b>49S/49R</b>
Protección de energización inadvertida	Actúa cuando existe una posible energización inadvertida mientras esta fuera de línea	<b>50/27</b>
Protección de alta frecuencia y falta de frecuencia del generador	Está operación de alta y baja frecuencia resulta del rechazo de carga total, parcial o las condiciones de sobrecarga, analizando la frecuencia de onda de tensión generada en los terminales del generador	<b>81</b>
Protección de falla de actuación(apertura) del interruptor del generador	Al momento que se produce una falla en la apertura del interruptor principal se puede producir una falla total o parcial del generador dependiendo de la red	<b>50BF-GCB</b>
Protección de desequilibrio de voltaje	Actúa ante un posible desequilibrio de voltaje que puede emerger por una falla en el sistema eléctrico o en el generador, al estar conectado a los TP's se realiza un comparativa, si se produce una diferencia de tensiones actuara	<b>60</b>

Fuente: Adaptado de (Tonato Muñoz, 2020)

Para la observación y análisis de parámetros establecidos durante la operación y funcionamiento de un generador se requiere de un componente modular motor-generador a escala de laboratorio. En este módulo se parte con un motor de inducción que hace las veces de motor primario o principal para emular el funcionamiento de una turbina acoplada mecánicamente al generador del sistema. Dicho motor debe ser controlado mediante un variador de frecuencia o similar para alcanzar la velocidad de sincronismo del generador de forma controlada, es decir, en condiciones de estado estacionario.

Mediante instrumentos de medición específicos se puede comprobar el funcionamiento del módulo motor-generador en diferentes etapas de pruebas, sea para trabajar en una red aislada o con posibilidad de acoplamiento a una red eléctrica interna del laboratorio, en el caso particular de la red interna del laboratorio de máquinas de la carrera electricidad CIELE.

Con el control de la velocidad del motor primario se permite la inyección potencia activa o mediante el control de la corriente campo se permite la inyección de reactivo en el sistema alimentado al ser acoplado a una barra infinita y también se logra un análisis similar de forma aislada.

## CAPÍTULO II

Al realizar la implementación de los diferentes materiales que conforman el módulo motor-generator se debe tener en cuenta el diseño del sistema físico, también, se debe conocer las características de los equipos y materiales necesarios, que permitan realizar la implementación efectiva del módulo, buen funcionamiento, y cumplir con las especificaciones estipuladas en el alcance del proyecto.

El módulo tuvo lugar en la Universidad Técnica del Norte campus universitario del Olivo situado en la Av. 17 de julio 5-21 y General José María Córdova ubicado específicamente en el laboratorio de máquinas la carrera de electricidad (CIELE).

El modelo utilizado para la instalación de un módulo motor-generator consiste en realizar el diseño del módulo, así como su implementación, para lograr el objetivo del capítulo se realiza el siguiente procedimiento:

- Adquisición de los equipos y materiales necesarios para el proyecto
- Respetar las normas de diseño del módulo motor-generator
- Construcción del equipo motor-generator en el laboratorio de máquinas eléctricas de la carrera de electricidad

De esta forma se desarrolla el trabajo; primero con el diseño del módulo de generación eléctrica que sirve como punto de partida para la gestión de los materiales y la instalación del módulo, a partir del diseño del módulo se procede con la adquisición de los equipos y fabricación de algunos materiales necesarios previamente homologados en el diseño.

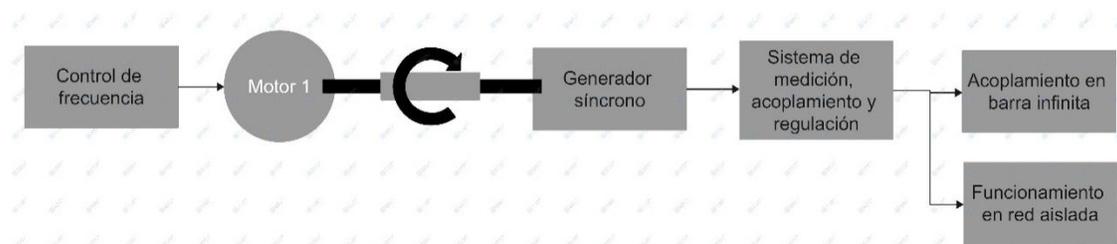


Figura 0.1 Diagrama de bloques del módulo motor-generator

Fuente: Autor

Una vez que se cuenta con todos los equipos y materiales se procede con la instalación del módulo siguiendo todos los parámetros especificados en el diseño del módulo y siguiendo los lineamientos del diagrama de bloques propuesto.

## 1.1. Diseño del módulo motor-generator

Se diseñó la parte física del módulo motor-generator con el software AutoCAD con medidas reales de los elementos. Usando materiales necesarios, en la Figura 2.2 se muestra el diseño estructural del sistema de generación.

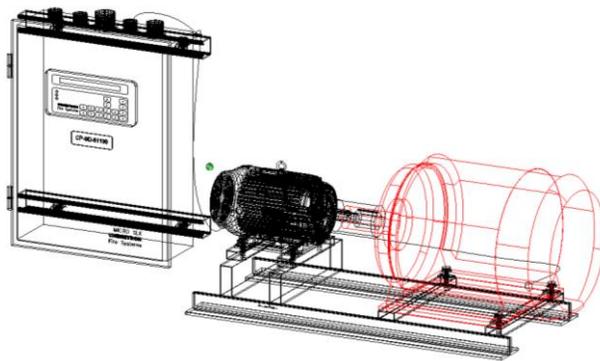


Figura 0.2 Representación estructural del módulo motor-generator

Fuente: Autor

La estructura base del módulo está dispuesta bajo el generador síncrono y el motor principal, las puntas de las dos máquinas rotativas están unidas por un acople mordaza, y conectados eléctricamente al panel de control en el cual están ubicados los instrumentos de medición y control.

### 1.1.1. Estructura metálica soporte para el módulo motor-generator

Debido a que el módulo motor-generator debe estar nivelado y para mitigar vibraciones, es necesario una base que fije el módulo sobre una superficie. El peso total del módulo ronda los 120 kg por lo que la estructura está diseñada en hierro.

Los ángulos de hierro para el soporte en la superficie fueron de medidas 40 x 40 x 6 mm.

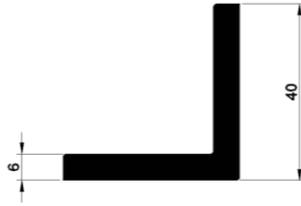


Figura 0.3 Dimensiones del ángulo de hierro

Fuente: Autor

En el proyecto se usó dos tipos de tubos rectangulares, el primero sirvió como soporte base para el generador y parte de la base del motor principal, sus medidas son 20X40X2 mm.

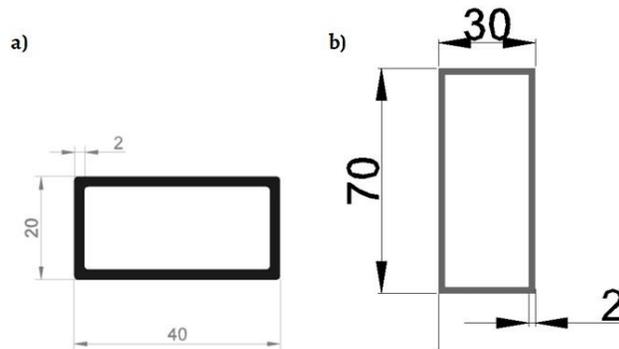


Figura 0.4 a) Primer tipo de tubo rectangular b) Segundo tipo de tubo rectangular

Fuente: Autor

El segundo tipo de tubo rectangular fue para nivelar el motor principal con respecto al generador, sus medidas fueron 30X70X2mm. Al ensamblar todos los ángulos y tubos se tuvo como resultado la cantidad de 1 metro, 0.6 metros de tubos rectangulares de hierro respectivamente y 3 metros de ángulos de hierro.

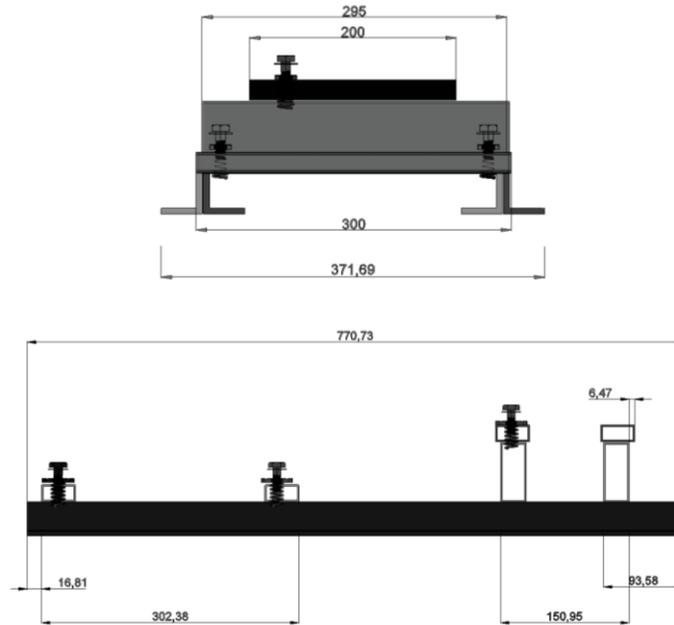


Figura 0.5 Dimensiones de la estructura base

Fuente: Autor

Para unir los ejes, tanto del generador como del motor principal, se diseñó un acople mordaza, el material fue hierro.

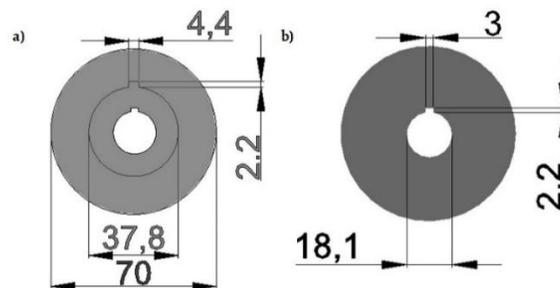


Figura 0.6 a) Cavidad del acople para el generador b) Cavidad para el motor principal

Fuente: Autor

Las dimensiones de dicho acople fueron hechas a partir a las medidas de los ejes de las maquinas rotativas.

### 1.1.2. Diseño del cuadro de control y circuito eléctrico

Se diseñó el cuadro de control sujeto a medidas reales de los equipos y materiales necesarios dentro del módulo de generación.



Figura 0.7 Diseño del gabinete de control

Fuente: Autor

En el diseño del tablero de control se establecieron los materiales para la visualización y control de los parámetros que demanda un equipo de generación; equipos de medición de magnitudes, variador de velocidad, contactor, selectores y para las respectivas conexiones se ocupó conectores con el propósito de realizar la conexión externamente dependiendo de la prueba a realizar.

Mediante el uso del software CadeSimu se realizó el circuito del módulo motor-generador Figura 2.8.

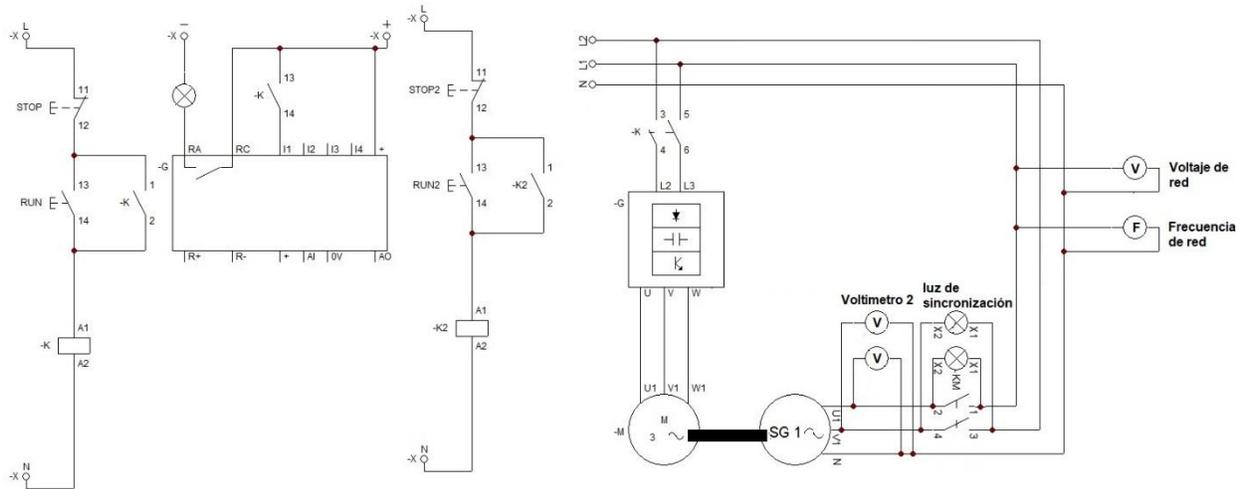


Figura 0.8 Circuito de control y fuerza del módulo motor-generator primario

Fuente: Autor

El diagrama eléctrico completo muestra la siguiente temática; primero se activa el variador de frecuencia para luego arrancar al motor primario hasta alcanzar velocidad de sincronismo con el generador, de ser el caso, al detectar que las fases; del generador y la red eléctrica, se sincronizan se activa un contactor y el generador estará listo para entrar a la red barra infinita.

### 1.1.3. Equipos y materiales

Los materiales y equipos necesarios se derivaron de las características del generador síncrono que se aplicó en el proyecto, para garantizar la funcionalidad del sistema de generación, se debe definir el diseño del sistema físico.

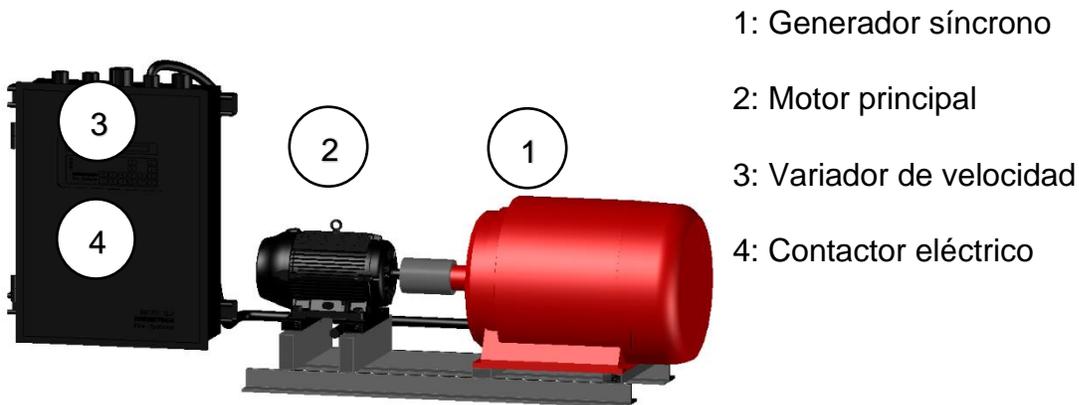


Figura 0.9 Representación gráfica del módulo motor-generator con sus partes principales

Fuente: Autor

A continuación, se presentan los materiales y equipos esenciales para la construcción del módulo motor-generator:

Tabla 0.1 Equipos y materiales imprescindibles del módulo motor-generator

<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Modelo</b>
<b>Generador síncrono</b>	1	Toyo A.C Generador
<b>Motor de inducción jaula de ardilla</b>	1	Siemens 0.5 Hp
<b>Variador de velocidad</b>	1	Telemecanique altivar 31
<b>Contactador eléctrico</b>	1	CHNT NXC-32
<b>Voltímetro</b>	2	Analógicos
<b>Frecuencímetro</b>	1	Analógico

Fuente: Autor

### **1.1.3.1. Selección y mantenimiento del generador síncrono**

Para la ejecución del presente trabajo se utilizó un generador síncrono de 4 polos salientes en el que se realizó el proceso de mantenimiento, dicho generador presenta las siguientes características:

Tabla 0.2 Características del generador síncrono

<b>Características eléctricas</b>	
<b>Voltaje de salida</b>	120/240
<b>Potencia de suministro</b>	6.5 kW
<b>Velocidad sincrónica</b>	1800 rpm
<b>Número de polos</b>	4p

Fuente: Autor

Dados los valores del generador como puntos de partida para el resto de los componentes de módulo, también se tuvo en cuenta sus características físicas para el armado de la estructura.

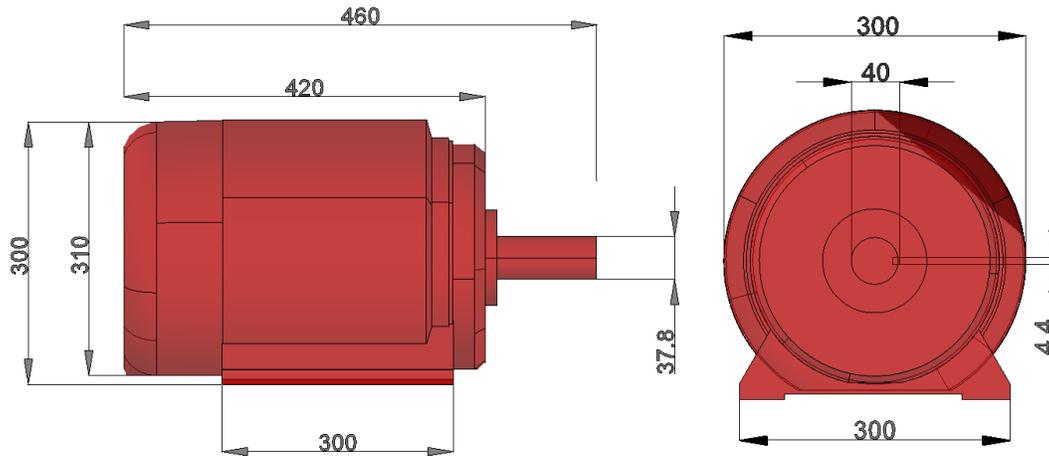


Figura 0.10 Dimensiones del generador síncrono en milímetros

Fuente: Autor

Debido a que el generador necesario para la ejecución del presente proyecto se encontraba despiezado se procedió con el rearmado, reacondicionamiento y mantenimiento. Continuación se muestra la representación gráfica del generador para la evaluación en cuestión, su correcto armado y mantenimiento.

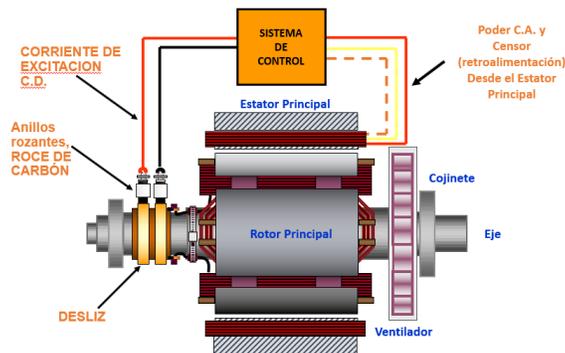


Figura 0.11 Representación gráfica del generador síncrono.

Fuente: adaptado de (Cummins, 2007)

Se dividió el mantenimiento del generador síncrono en tres partes; el mantenimiento del rotor, mantenimiento del estator y el mantenimiento de la carcasa.

En la reparación de las bobinas se utilizaron bandas de sujeción, ya que el aislamiento de las vueltas de la bobina estuvo degradado y los conductores en buen estado. Los conductores de cobre se limpiaron antes de aplicar el nuevo aislamiento de las espiras con una resina termoestable, además, los anillos de deslizamiento utilizados para permitir las conexiones externas de las bobinas de arranque a los devanados del rotor tienen un aislamiento de tierra en los que puede darse un cortocircuito, debido que los mecanismos de fallo por envejecimiento térmico son similares a los encontrados en los devanados del estator.



Figura 0.12 Mantenimiento del rotor del generador

Fuente: Autor

Se presentaron evidentes faltas en el aislante de los bobinados del rotor, un claro desgaste en los anillos rozantes y en los cojinetes o rodamientos, se aplicó una capa de resina en los devanados del rotor, se rectificó el cobre de los anillos deslizantes y se cambió los rodamientos.

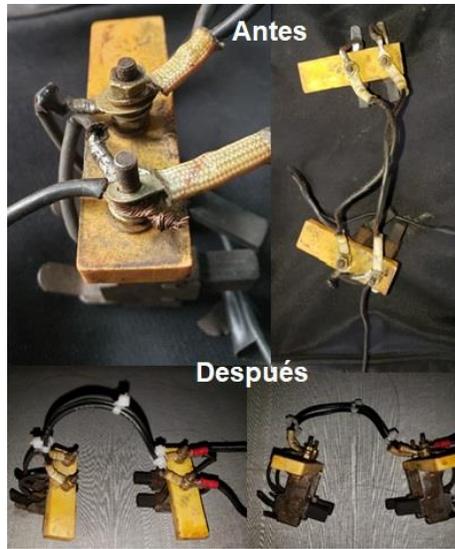


Figura 0.13 Mantenimiento de los cepillos y escobillas del generador

Fuente: Autor

Esta operación es para asegurar que haya un buen contacto eléctrico y contacto mecánico en dirección axial y tangencial entre anillos rozantes y escobillas.

Los devanados del estator sufren daños localizados durante el mantenimiento o fallan en servicio, a veces pueden ser reparados en una corta parada, y volver al servicio en pocos días, esto puede ser especialmente importante en generadores críticos en los que no hay respaldo, y en los que se pierde una producción significativa como resultado de un fallo, por lo general, una reparación de este tipo es posible cuando el daño está localizado y los efectos colaterales son limitados, además, estas reparaciones tienen más probabilidades de éxito si, el daño se produce en una barra o bobina que funciona a baja tensión.

En el caso del estator del generador del presente proyecto, se evidencio suciedad excesiva dentro inductor, bobinas móviles dentro del núcleo del estator y un claro déficit en el aislante del conductor de las bobinas.



Figura 0.14 Mantenimiento del estator del generador

Fuente: Autor

Se desmontó el estator completamente, se limpió, se procedió a aplicar resina nuevamente a los devanados y su respectiva sujeción con el proceso de amarre de bobinas para evitar pérdidas, los cables de conexión se cambiaron.



Figura 0.15 Mantenimiento de la carcasa del generador

Fuente: Autor

Para evitar desgaste en la parte externa por óxido y para una evidente mejora estética se lijó todo el exterior del generador y se procedió a su respectivo pintado.

### **1.1.3.2. Motor de inducción jaula de ardilla**

El motor primario mueve al generador síncrono mediante la unión de los dos ejes horizontalmente.



Figura 0.16 Motor de inducción jaula de ardilla

Fuente: Autor

Se eligió un motor de inducción jaula de ardilla con un voltaje de trabajo de 200/380V, 1720 rpm, marca siemens.

### **1.1.3.3. Variador de velocidad**

Para control del motor principal, es un variador de frecuencia de la familia Altivar 31 M3X (ATV31) de controladores de accionamiento en CA y de frecuencia ajustable.



Figura 0.17 Variador de velocidad Telemecanique altivar 31 M3X

Fuente: Autor

Se utiliza para controlar motores asíncronos trifásicos con voltaje de salida de 200 V -15% a 240 V +10%, rango de frecuencia de salida 0 a 500 Hz. Para reconocer el conexionado del variador de frecuencia se aplicó el respectivo circuito en las especificaciones del aparato en configuración a dos hilos.

El variador de frecuencia elegido tiene la capacidad de controlar potencias hasta de 0.5 Hp y tiene la opción de comunicación serial con opción de control externo mediante programación.

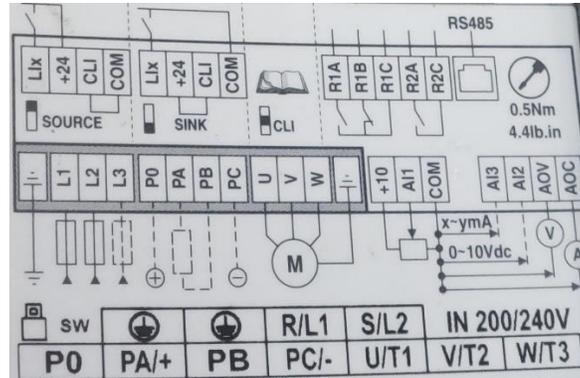


Figura 0.18 Circuito del variador de frecuencia Telemecanique altivar 31 M3X

Fuente: Manual del instrumento

#### 1.1.3.4. Contactor eléctrico

Para cerrar el circuito de acoplamiento entre fases cuando el generador trabaja acoplado a una barra infinita se usó un contactor CHNT NXC-32 con características de voltaje de hasta 500V, corriente hasta 32A con la bobina de enclave de 120V, situado dentro del gabinete de control.



Figura 0.19 Contactor CHNT NXC-32

Fuente: Autor

#### 1.1.3.5. Equipos de medición

Para la medición de magnitudes entregadas por el módulo de generación es necesario instrumentos de medida específicos como los son; el frecuencímetro y el

voltímetro quienes permiten medir las magnitudes necesarias para las pruebas de funcionamiento.

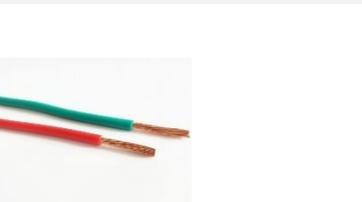


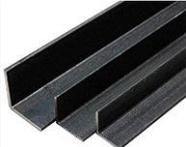
Figura 0.20 Frecuencímetro y voltímetro analógicos

Fuente: Autor

### 1.1.3.6. *Materiales complementarios*

Tabla 0.3 Materiales complementarios del módulo

Componente	Cantidad	Descripción	Imagen
<b>Gabinete</b>	1	30 x 40 x 20 cm	
<b>Acople tipo matrimonio</b>	1		
<b>Selectores eléctricos</b>	3	Selectores eléctricos de 2 posiciones 220 V 4,5 A.	
<b>Conductores eléctricos</b>	-20m -15m	- Cable THHN número 10 para 600V a 90 °C - Cable THHN número 14 para 400V a 90 °C	

<b>Glándulas de cable</b>	2		
<b>Cinta Helicoidal para cables</b>	3m	Cinta Helicoidal de polietileno de baja presión	
<b>Rieles metálicos</b>	1(1.5m)	Riel din perforado 7.5mm	
<b>Tubos rectangulares de hierro</b>	-1 metro -0.6 metros	-Tubo rectangular de hierro 400 x 200 x 1.8 mm -Tubo rectangular de hierro 700 x 300 x 1.8 mm	
<b>Conector banana</b>	15		
<b>Borneras para conductores</b>	12	Borneras 500V 30A	
<b>Ángulos de hierro</b>	3 metros	Angulo hierro 400 x 400 x 2 mm	
<b>Boquilla de cerámica</b>	1	Boquilla de cerámica a 220v	
<b>Bobillos</b>	1	Bobillo incandescente 2200v 100W	

**Pernos con turca** 11 Pernos de acero ¼ x 1 ¼ in con tuerca



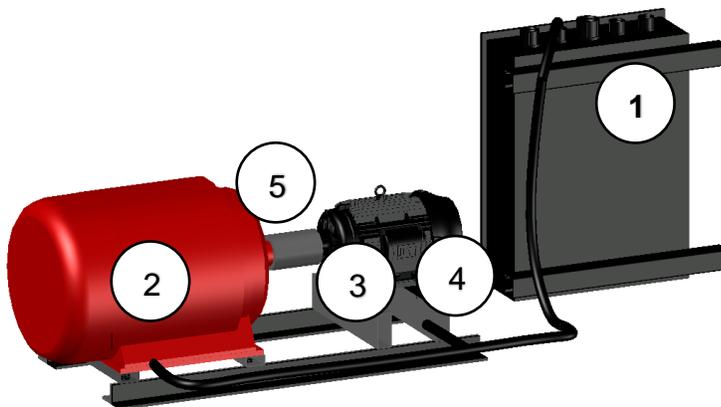
**Arandelas de presión** 11 Arandelas de presión para pernos de ¼ in



**Tornillos** 25 Tornillo colepato ½ in



Fuente: Autor



- 1: Gabinete de control; están ubicados, el contactor, variador de velocidad, botoneras sujetas mediante rieles, instrumentos de medición y los pernos
- 2: Cables de conexión
- 3: Cinta helicoidal para cables
- 4: estructura de acero
- 5: acople tipo matrimonio

Figura 0.21 Representación del módulo motor-generator con sus partes complementarias

Fuente: Autor

Cada elemento necesario para para la construcción de equipo de generación está ubicado de manera oportuna dentro del módulo, una vez se cuenta con todos los materiales y equipos establecidos se procede con la construcción del módulo motor-generator

## 1.2. Implementación del módulo motor-generator

Una vez realizado todo el diseño de modulo, puesta a punto del generador y obtenidos todos los materiales y equipos necesarios, se procedió con la instalación del módulo, de acuerdo con los esquemas que se establecieron previamente.

### 1.2.1. Elaboración de la estructura metálica

En la fabricación de la estructura metálica se usó los tubos rectangulares y ángulos de hierro, de acuerdo con dimensiones en el diseño del módulo, bastó con trasladarlas al tubo, para su posterior corte.



Figura 0.22 Fabricación de la estructura del módulo

Fuente: Autor

Finalmente se realizó el proceso de soldadura de uniones, agujereado con maquina taladradora, el lijado y pintado de la estructura.

### 1.2.2. Construcción y nivelación del acople entre el motor principal y el generador

Se tuvo que establecer las medidas de cada eje; del generador y del motor primario, para la correcta fabricación del acople, a partir de una pieza cilíndrica de hierro virgen en un torno de precisión.



Figura 0.23 Fabricación y montaje del acople

Fuente: Autor

Una vez posicionados el motor principal y el generador, se niveló ambos instrumentos mediante arandelas y pernos sobre la base del motor principal. Se presentaron vibraciones en el módulo en funcionamiento por lo que se las mitigó con la incorporación de cauchos bajo la estructura y el motor principal.



Figura 0.24 Nivelación del motor principal con respecto al generador síncrono

Fuente: Autor

Consecuentemente se acondicionó el área para la ubicación del módulo. Se realizó los agujeros para los pernos de la estructura base para el generador y para la estructura donde está ubicado el tablero de control.



Figura 0.25 Puesta a punto del lugar del módulo

Fuente: Autor

Se posicionaron la estructura del módulo y del tablero de control con espacio suficiente para una correcta visualización de todo el proyecto.

### 1.2.3. Armado del tablero de control

En el tablero de control están dispuestos, el contactor eléctrico, variador de frecuencia, dispositivos de medición, botoneras, borneras, luz de sincronización y rieles.

En el circuito se muestra el conexionado de los elementos de control del motor primario, posteriormente se colocaron los cables que conectan tanto al generador síncrono como al motor primario, recubiertos con cinta helicoidal, sujetos a la estructura por correas plásticas de amarre y al gabinete por las glándulas para el cable.

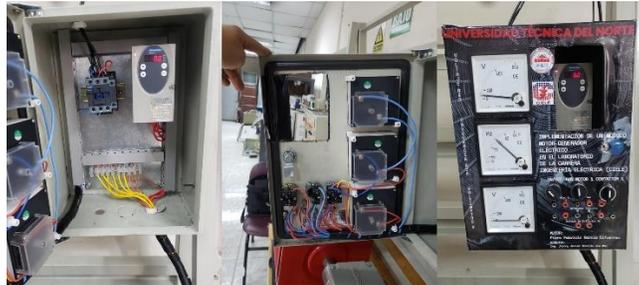


Figura 0.26 Construcción del tablero de control

Fuente: Autor

### 1.2.4. Variador de frecuencia

Una vez terminado el armado del tablero de control y del circuito de fuerza se tiene que ingresar los datos de placa al variador de frecuencia, configurar su funcionamiento en modo manual, para el control del motor primario.

Antes del procedimiento para el ingreso de los parámetros de placa del motor, es necesario que el variador Altivar 31 tenga todas sus configuraciones en estado de fábrica, por lo cual se procede a realizar RETURN THE DRIVE TO FACTORY SETTINGS:

(dcr):menu:FCS ->Ini

Es necesario mantener ENTER presionado para la configuración.

Al realizar el formateo del variador de frecuencia se continua con el ingreso de los parámetros del motor en SET MOTOR PARAMETERS FROM NAME PLATE:

(drc-) menu: bFr, UnS, FrS, nCr, nSP, COS

Se realiza un auto ajuste para optimizar el lazo de control del motor:

(drC-) menu: Tun -> Yes

Para el funcionamiento del modo de uso manual es necesario poner el Altivar 31 en configuración a 2 hilos para su activación:

(1-0-) menu: tCC -> 2C

Para controlar la frecuencia de suministro con los botones integrados en el panel de programación del Altivar 31 es necesario darle el nivel 2 o más de acceso a las funciones:

(CfL-) menu: LAC->L2

Es necesario mantener ENTER presionado para la configuración.

Para la puesta en marcha del motor se debe cumplir la siguiente configuración en el menú de supervisión:

(SUP) menu: rFr->enter

Activando el selector de activación del motor con el variador de velocidad previamente configurado a dos hilos se podrá controlar la frecuencia mediante el panel de programación integrador en el Altivar 31.

### **1.3. Funcionamiento del módulo motor-generador**

Para la comprobación y análisis de parámetros establecidos durante la operación y funcionamiento del generador se requiere que el módulo motor-generador cumpla con los requerimientos de diseño físico y eléctrico establecidos.

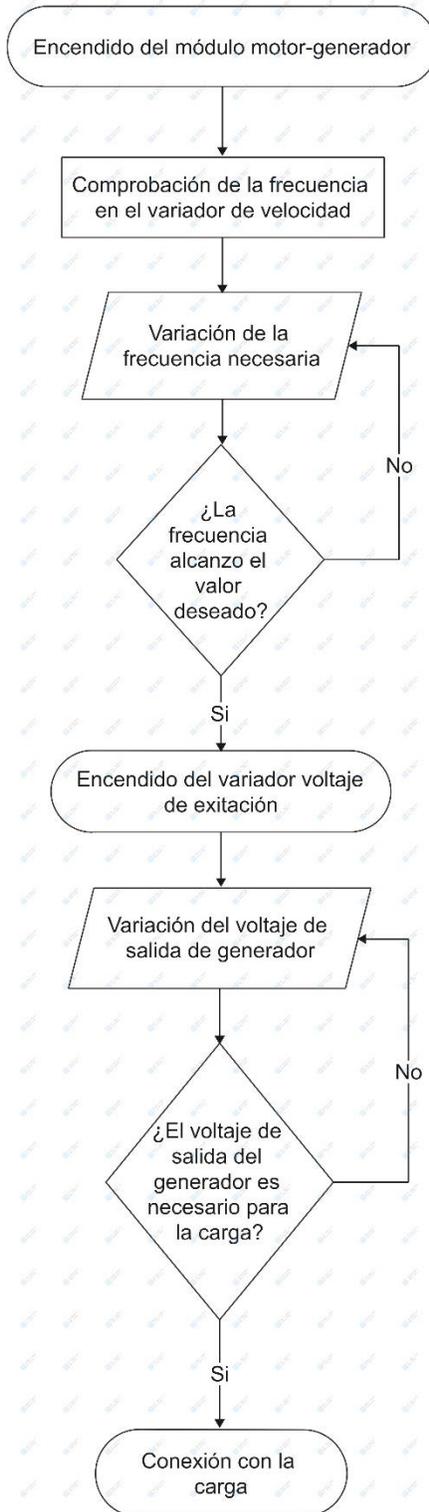


Figura 0.27 Flujoograma del generador síncrono suministrando potencia en red aislada

Fuente: Autor

Dicho diseño empieza con el control del motor de inducción que hace las veces de motor primario o principal, quien está acoplado mecánicamente al generador del sistema, dicho motor debe ser controlado mediante un variador de frecuencia para alcanzar la velocidad de sincronismo del generador de forma controlada, luego, y mediante instrumentos de medición homologados en el diseño se puede comprobar los valores eléctricos de salida del módulo motor-generador.

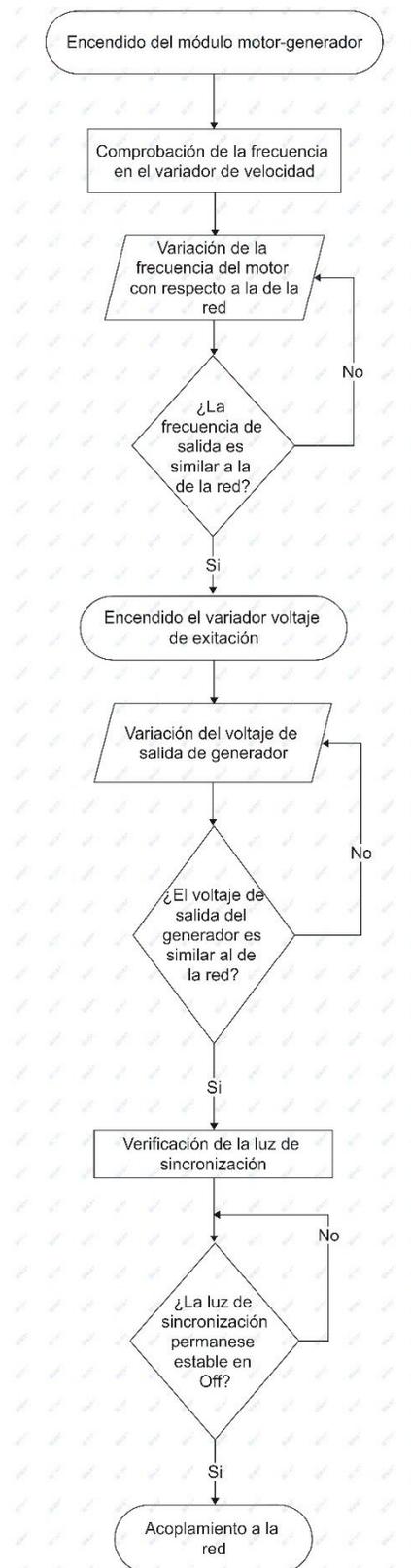


Figura 0.28 Flujograma de proceso de acoplamiento a la red del generador síncrono

Fuente: Autor

Al controlar el motor de inducción quien está acoplado mecánicamente al generador del sistema, dicho motor debe ser controlado mediante un variador de frecuencia para alcanzar la velocidad de sincronismo del generador de forma controlada, luego, y mediante instrumentos de medición homologados en el diseño se puede comprobar los valores eléctricos de salida del módulo motor-generador. Al sincronizar el generador con la red se verifica que la frecuencia, voltaje, y secuencia de fases del generador síncrono cumplan con las características óptimas para el acoplamiento con la red.

Controlando de la velocidad del motor primario se inyecta potencia activa y mediante el control de la corriente de campo se suministra potencia reactiva al sistema alimentado, cuando el módulo opera acoplado a una barra infinita, al igual que en la operación ha estado aislado.

## **CAPÍTULO III**

En el presente capítulo se valida de carácter práctico al módulo motor-generator, gracias al análisis del comportamiento de generador síncrono a través del ensayo en los distintos tipos de modos de funcionamiento, tales como; el generador conectado en red aislada y acoplado a una red barra infinita, para ello se aplicó el método de verificación.

Para comprobar el funcionamiento del proyecto se realizan distintas pruebas para diagnosticar el estado y desempeño cuando el generador trabaja aislado, es decir cuando suministra toda la potencia que absorbe una carga, y acoplado a una red infinita.

En el presente trabajo de grado se utiliza un generador síncrono de 4 polos, se manejó una frecuencia de 60 Hz y con velocidad de sincronismo es 1800 rpm. Para que el generador síncrono entregue la potencia eléctrica correspondiente en sus terminales de salida es necesario que alcance velocidad de sincronismo, es decir cuando la velocidad del rotor iguala a la velocidad del campo del estator.

Una vez culminadas las pruebas se presenta el respectivo manual de mantenimiento y operación del módulo motor-generator para las prácticas correspondientes de usuarios.

Antes de realizar cualquier prueba con el equipo motor-generator es necesario realizar las conexiones debidas en el módulo.

### **1.5. Preparación previa del módulo motor-generator**

En el presente proyecto se realizaron las pruebas con el generador conectado en red aislada y acoplado a una red barra infinita, cada una con topologías distintas, pero con gran importancia. Debido a la sensibilidad de los instrumentos, es necesario realizar el conexionado correspondiente a cabalidad antes de cualquier prueba.



Figura 0.1 Fuente de voltaje variable AC y terminales de conexión al tablero de control

Fuente: Autor

Al momento de la generación el voltaje que entregaba el generador funcionando a una velocidad de 1800 rpm, es decir a 60 Hz, el voltaje de salida fue superior al necesario, 140 voltios en comparación con 120 voltios necesarios, esto debido a que el voltaje de excitación propio del generador fue de 60V quien creaba una corriente de excitación muy alta generando más voltaje de salida del necesario.

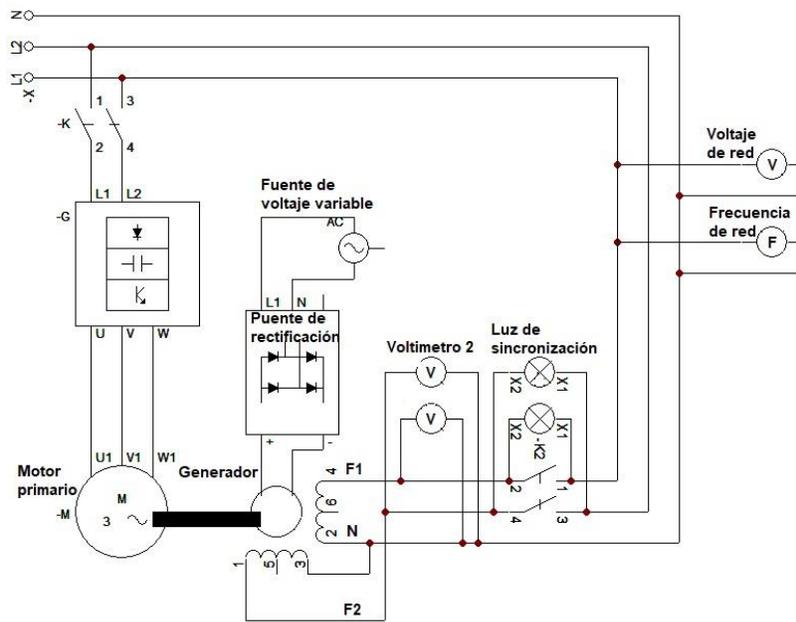


Figura 0.2 Circuito con el generador conectado a una fuente de voltaje de excitación externa

Se cambió dicha fuente auto excitada por una fuente de voltaje AC externa quien, modifica la corriente de excitación en DC al estar conectada a un puente rectificador y

por ende la regulación del voltaje de salida del generador. Dicha fuente se conecta en cualquier tipo de prueba en los terminales de “Voltaje de Excitación” Figura 3.1.



Figura 0.3 Voltaje entregado por la fuente de voltaje externa

Fuente: Autor

El voltaje necesario que el variador de voltaje debe suministrar para que el generador entregue 120V en voltaje de fase y 240V en voltaje de línea, con una frecuencia de 60 Hz es de 43V.

### 1.5.1. Conexión al trabajar generando en red aislada

Al trabajar con el módulo generador en red aislada, es decir cuando suministra toda la potencia demandada en sus terminales, es necesario realizar la conexión adecuada en el tablero de control.

El generador del presente trabajo cuenta con 2 devanados partidos en su estator lo cual permite realizar distintas conexiones con distintos valores de voltajes, a continuación, se indica las tres maneras principales de conexión de las bobinas del generador en 120V y en 240V:

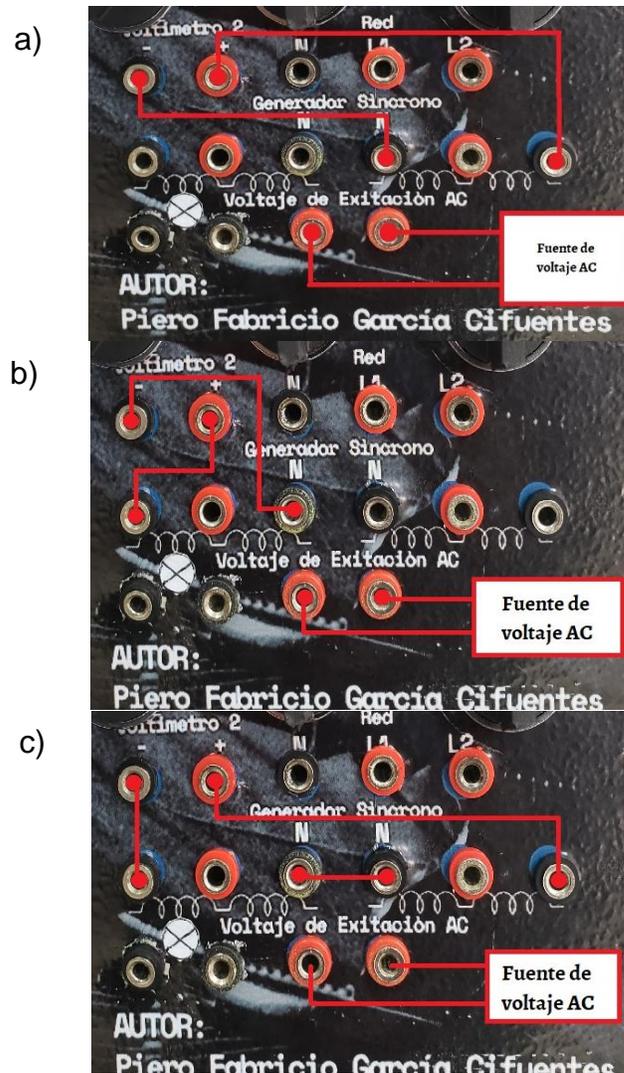


Figura 0.4 a) Conexión de 120V primera fase b) Conexión de 120V segunda fase c) Conexión de 240V fases juntas

Fuente: Autor

Debido a que en el generador existen dos devanados de 120 voltios, cuando el generador opera en red aislada es posible conectar sus bobinas de tres maneras, 120V de voltaje de fase en los terminales la primera bobina, 120V de voltaje de fase en los terminales de la segunda bobina y 240V de voltaje de línea en los terminales de las dos bobinas conectando el neutro. Es intuitivo entender que en los terminales de las bobinas partidas se encuentra el 50% de los voltajes de fase al igual que el voltaje de línea, finalmente en los terminales “Voltaje de Excitación” se conecta una fuente de voltaje AC regulable. En la Figura 3.4 la conexión es para el sistema en vacío, pero si se precisa

realizar pruebas con carga la conexión deberá estar conectada en paralelo con el “Voltímetro 2”.

### 1.5.2. Conexión cuando el generador trabaja acoplado a una red barra infinita

Cuando el generador se acopla a la red se necesita acoplar cada fase de 120V, aunque existió un inconveniente: cada fase del generador estaba separada por 90° y las fases de la red tienen sus fases separadas por 120° lo que ocasiona que sea imposible acoplar las dos fases presentes en el generador con las condiciones al momento del generador síncrono implementado.

A continuación, se explica el conexionado de las dos maneras para realizar el acoplamiento del generador a la red barra infinita con 120V en ambos casos.

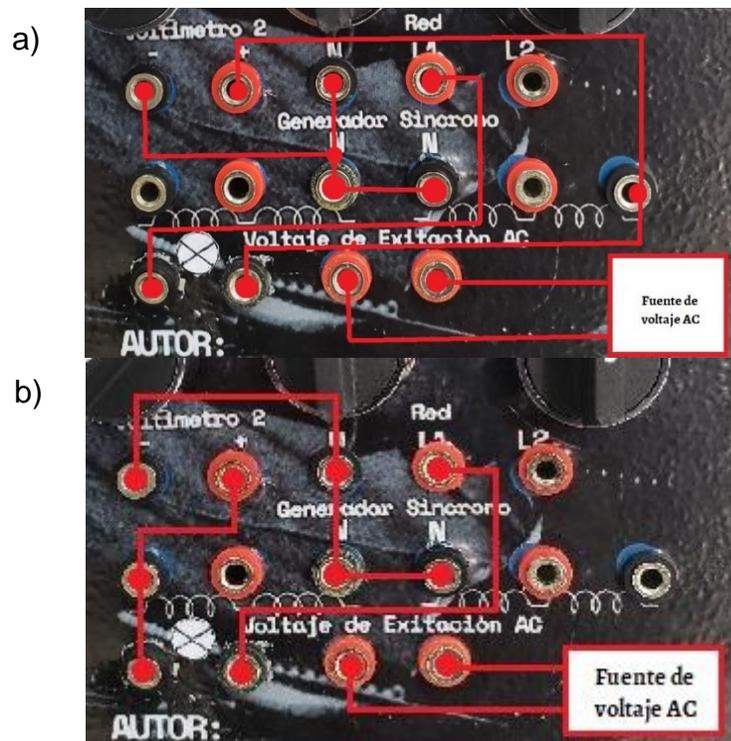


Figura 0.5 a) Conexión de acoplamiento con la primera fase del generador b) Conexión de acoplamiento con la segunda fase del generador

Fuente: Autor

En el caso de trabajar con el generador acoplado a la red barra infinita el “Voltímetro 2” se conecta a los terminales de la fase elegida del generador, se puentea

el neutro de la red y el generador, un extremo de conexión de la luz indicadora de sincronización se conecta a la fase del generador a acoplar y el otro extremo a la fase de la red, finalmente en los terminales “Voltaje de Excitación” se conectan a una fuente de voltaje AC regulable.

### **1.5.3. Preparación del tablero de control**

Una vez terminadas las conexiones de la prueba elegida para realizar con el módulo motor-generador es necesario activar el tablero de control y prepararlo para su operación.

Al encender el módulo se debe establecer el control de la frecuencia en modo manual a través del panel incorporado de programación en el variador de frecuencia. Para la puesta en marcha del motor se debe cumplir la siguiente configuración en el menú de supervisión:

(SUP) menu: rFr->enter

Al poner en marcha el motor principal, bastará con presionar los botones arriba y abajo presentes en el panel de programación del variador de frecuencia para realizar el cambio de velocidad en el motor y por ende aumentar o disminuir la frecuencia del generador síncrono.

### **1.6. Prueba del generador síncrono en red aislada**

El generador síncrono funciona en red aislada cuando suministra toda la potencia que demanda la carga. En las pruebas realizadas se empleó el siguiente circuito.

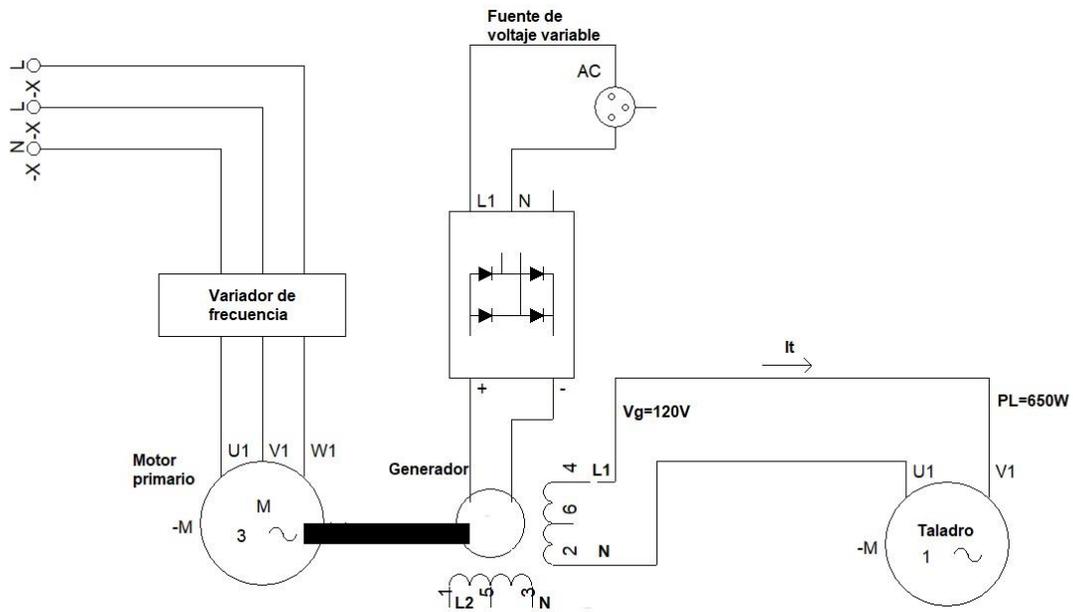


Figura 0.6 Diagrama eléctrico del generador suministrando en red asilada

Fuente: Autor

Al conectar la carga con una potencia de carga PL y un voltaje de suministro o de generación  $V_g$  se crea un campo en estator que va en oposición a la dirección del rotor, por lo que, al mantener la velocidad del motor primario es necesario que el variador de frecuencia eleve el par mecánico de dicho motor hasta que la velocidad sea constante.



Figura 0.7 Mediciones de la carga conectada al generador operando en red asilada

Fuente: Autor

En las pruebas realizadas se utilizó una carga inductiva (Taladro) quien opera nominalmente a 120 V AC y absorbe una potencia activa de 600 W, antes de conectar la carga se establecieron los valores de chapa de características del taladro; el voltaje de salida y la frecuencia de servicio en el generador de deben verificar. Se pudo constatar

que la potencia que demandaba el taladro en efecto fue de 600 W suministrando un voltaje de 120 V a una frecuencia de 60 Hz.

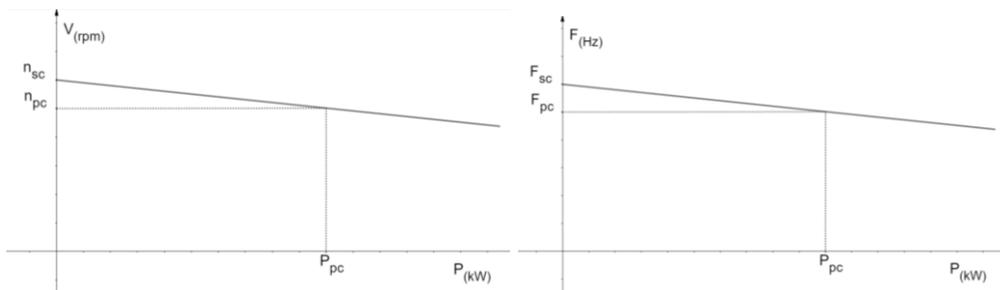


Figura 0.8 Velocidad del motor primario con respecto a la potencia del generador

Fuente: Autor

Para el caso de estudio, la velocidad del motor primario está relacionada con la frecuencia de salida del generador que a su vez está relacionada con la potencia que entrega el generador, siendo  $n_{sc}$  la velocidad de motor primario en vacío,  $n_{pc}$  la velocidad en plena carga, la frecuencia en vacío del generador  $F_{sc}$  y la frecuencia del generador a plena carga  $F_{pc}$ . La velocidad en plena carga del motor primario es directamente proporcional a la potencia en plena carga del generador  $P_{pc}$ , de igual manera la velocidad en vacío del motor  $n_{sc}$  es directamente proporcional a la potencia de salida del generador en vacío  $P_{sc}$ .

Con un voltaje AC de 43 voltios suministrados a un puente rectificador dentro del generador se generó 120 V de voltaje de fase y 240 de voltaje de línea y una frecuencia aplicada al motor primario de 60 Hz quien establece la potencia necesaria para conectar la carga que no debe exceder excesivamente la potencia que soporta el variador de frecuencia. Constructivamente el generador síncrono usado en el presente trabajo llega a suplir demanda de hasta 6.5 kW en sus terminales y que depende directamente al par aplicado a su eje, a la par de voltaje de fase de 120V y voltaje de línea de 240V trabajando con una frecuencia de placa de 60 Hz.

## 1.7. Prueba del generador síncrono acoplado a la barra infinita

Para realizar la prueba de acoplamiento a la red se requiere el ángulo de desfase tiene entre las fases tanto del generador y de la red.

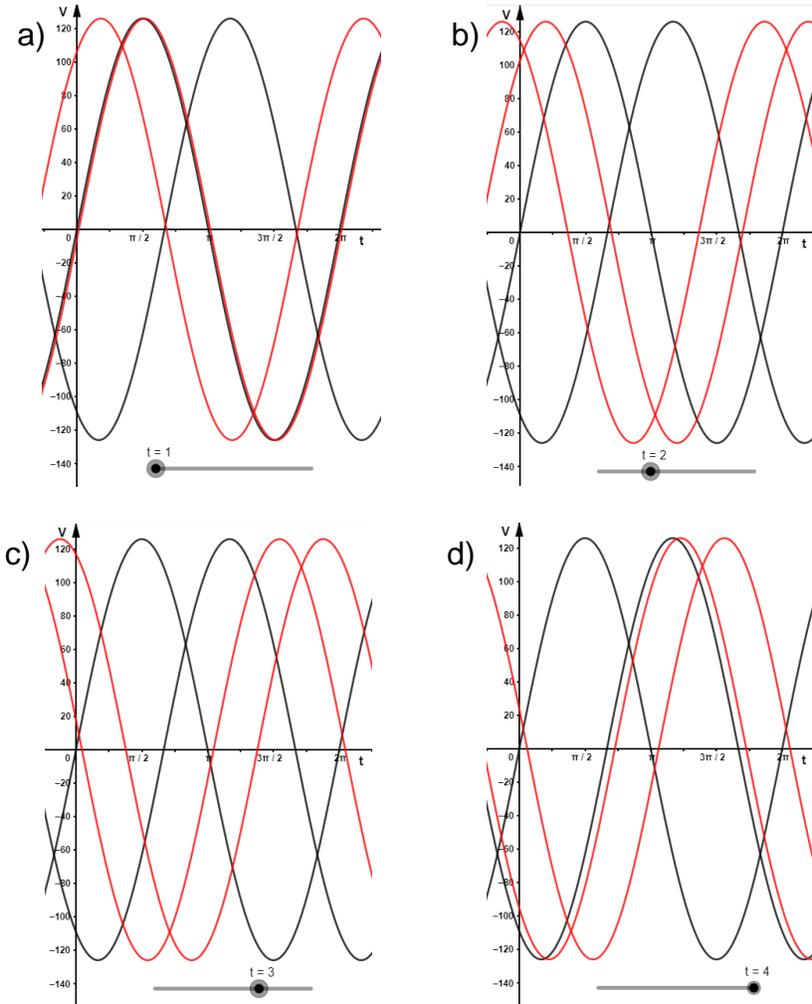


Figura 0.9 Señal de frecuencia en acoplamiento bifásico a)  $\tau=1$  b)  $\tau=2$  c)  $\tau=3$  d)  $\tau=4$

Fuente: Autor

La red para acoplar con el generador tiene sus fases desfasadas con un ángulo de  $120^\circ$  ( $2/3\pi$ ) propios del sistema de distribución nacional graficadas en color negro, el generador tiene sus fases separadas por  $60^\circ$  ( $1/3\pi$ ) en color rojo, aunque existan

igualdad de voltajes y frecuencias en los dos sistemas no es posible sincronizar las dos fases del generador y de la red, debido a que nunca entraran en sincronía.

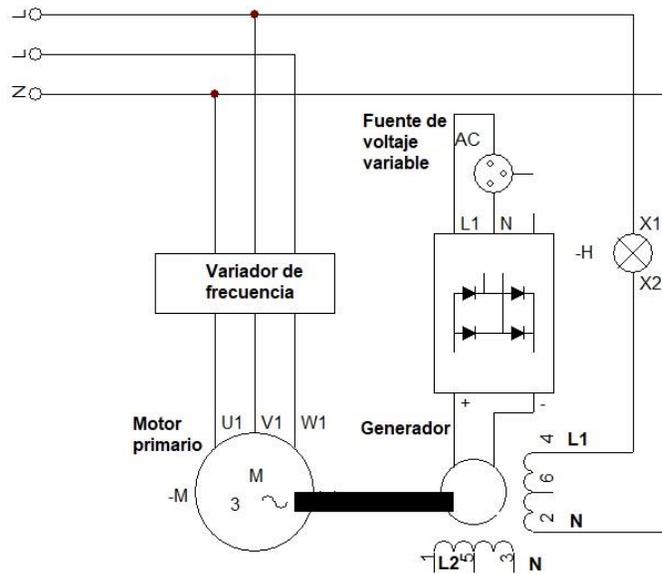


Figura 0.10 Diagrama eléctrico del generador acoplado a la red barra infinita  
Fuente: Autor

El acoplamiento de una de las fases del generador y una fase de la red se realiza igualando los voltajes, frecuencias y ángulos de fase de onda de la red y el generador

a)



b)

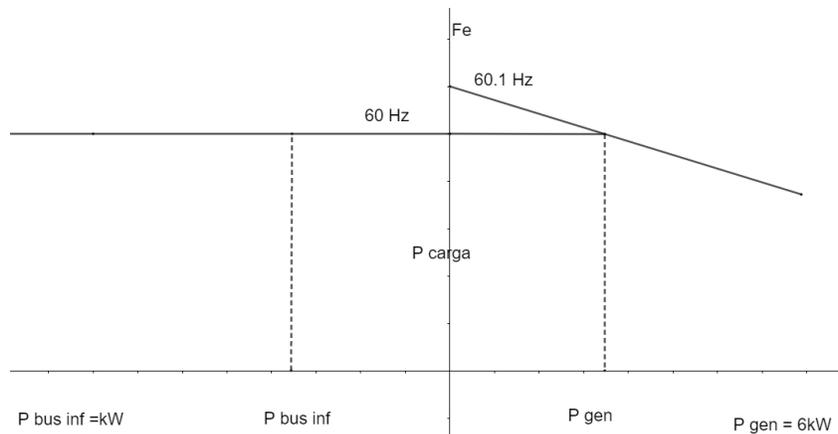


Figura 0.11 a) Frecuencia de la red y del generador b) Diagrama de casa cuando el generador está conectado a barra infinita

Fuente: Autor

En la figura 3.8 b) se muestra el diagrama de casa del generador, para acoplamiento a la red, con un ligero adelanto de la frecuencia del generador se logra que la secuencia de fases se iguale, cumpliendo así uno de los requerimientos para el acoplamiento del generador con la red.

a)



b)

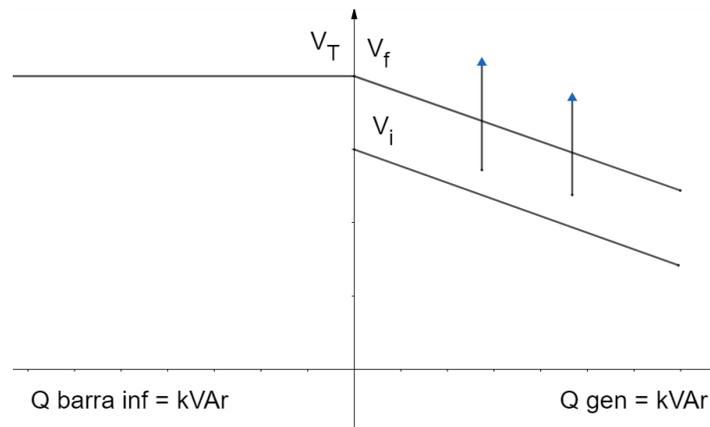


Figura 0.12 a) Voltaje de excitación AC, voltajes de la red y del generador b) Diagrama de casa de los voltajes con respecto a la potencia aparente del sistema

Como la frecuencia del generador es similar a la de la red, para el acoplamiento necesariamente los voltajes deben tener la misma magnitud, esto se consigue cambiando la corriente de excitación variando el voltaje dentro del rotor del generador. En este caso, la variación de dicho voltaje se realizó mediante una fuente de voltaje variable conectada al puente rectificador del generador, cuando se eleva el voltaje de excitación, el voltaje en los terminales del generador se acerca al de la red.

a)



b)



Figura 0.13 a) Cumplimiento de los requerimientos de voltaje y frecuencia para el acoplamiento del generador con la red barra infinita b) Método para identificar la secuencia de fases iguales mediante la luz indicadora

Finalmente, para acoplar el generador en la red del laboratorio de máquinas de la carrera de Electricidad fue necesario que la secuencia de fases entre la red y el generador sea igual, esto se consigue en este caso en particular con el método de las lámparas como se indica en el circuito de la Figura 3.10, conectando los terminales de la luz indicadora entre una fase de la red y una fase del generador con los terminales neutros de los dos sistemas comunes.

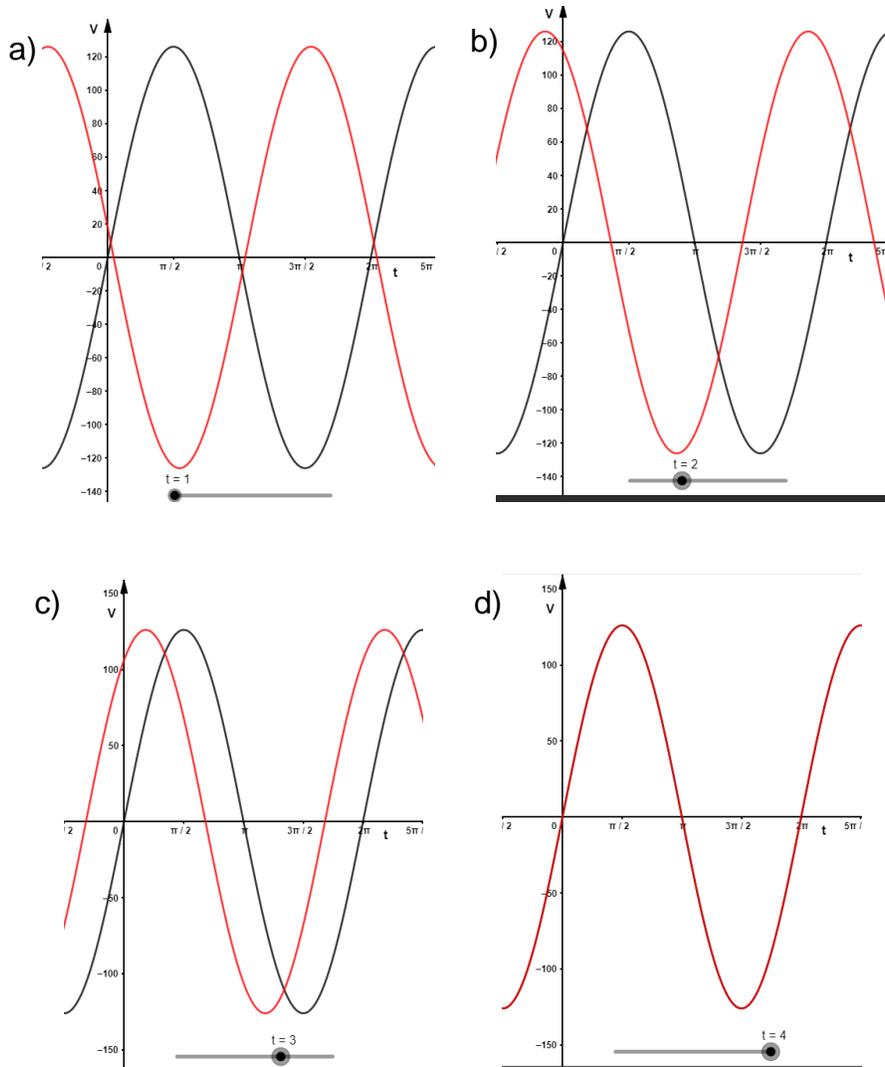


Figura 0.14 Señal de frecuencia en acoplamiento monofásico a)  $\tau=1$  b)  $\tau=2$  c)  $\tau=3$  d)  $\tau=4$

Fuente: Autor

Es necesario que la frecuencia sea ligeramente superior a la de la red en alrededor 0.1 Hz más, para que la frecuencia del generador pueda alcanzar a la de la red a acoplar, además, los voltajes de la red y del generador deben ser los mismos, finalmente, la secuencia de fases debe ser igualada con respecto a la red, en este caso se lo realizó con el método de las lámparas.

Al existir igualdad de magnitudes como se muestra en los instrumentos de medición de la Figura 3.12 a), la velocidad de parpadeo de la lampara se reduce debido a que las ondas senoidales son similares pero no tienen el mismo ángulo de fase, aumentando la frecuencia del del generador ligeramente se permite sincronizar las fases

del generador y la red, la lampara se enciende cuando existe una diferencia de potencial entre ondas Figura 3.14 a), si la lampara conectada entre las fases esta encendida, las ondas senoidales no coinciden y si está completamente apagada Figura 3.12 b), la secuencia de fases es igual Figura 3.14 d), y el generador está listo para el ingreso a la red de distribución.

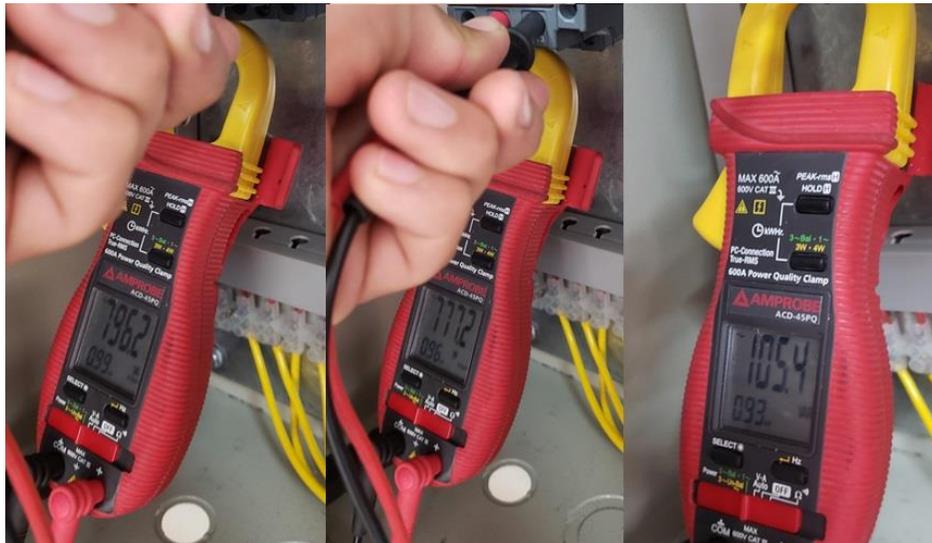


Figura 0.15 Triangulo de potencias medidas en la prueba acoplado el generador a la red de CIELE

Fuente: Autor

En la prueba se consiguió una potencia aparente de 784W, potencia activa de 777W y reactiva de 105VAR con un respectivo factor de potencia ( $\cos \alpha$ ) de 0.99. Una vez acoplado el generador de la red se puede aumentar la corriente campo que a su vez aumentará el voltaje de fase del generador, lo cual permite aumentar potencia reactiva al sistema y aumentando la frecuencia el variador para la velocidad del motor de inducción, se permite suministrar mayor o menor potencia activa al sistema.

## Conclusiones

- La información detallada en el Capítulo I del presente trabajo muestra al generador síncrono, sus características, fundamentos teóricos y parámetros clave en la etapa de generación, y los modelos de generación con el generador síncrono, para realizar el diseño, implementación de un módulo motor generador y pruebas con el equipo necesario.
- La implementación o construcción del módulo motor-generador demandó la realización del diseño físico y eléctrico, la adquisición de distintos equipos y materiales necesarios, la construcción del equipo se realizó siguiendo los lineamientos presentados en el diseño y su puesta a punto para realizar pruebas de funcionamiento
- Las pruebas con el generador síncrono del presente trabajo fueron acoplado a una red barra infinita y generando de manera aislada, mediante el control de magnitudes de voltaje y frecuencia se generó voltaje de línea de 120V y un voltaje de fase de 240V con una frecuencia de 60Hz, se acopló el generador con la red eléctrica del laboratorio de máquinas de la carrera de electricidad con el módulo trabajando con 126V y 60Hz, el equipo motor-generador tiene la practicidad de realizar pruebas de funcionamiento ya que su sistema es de acceso libre para su conexionado en prácticas de funcionamiento para la etapa de generación.

## Recomendaciones

- Para realizar la sincronización con el generador conectado a una red trifásica se recomienda revisar la distribución devanados del generador pudiendo existir la opción de establecer su forma de bobinado para generación trifásica, es muy importante tener en cuenta el ángulo de separación de fases del generador para que coincidan con el sistema a acoplar
- Los sistemas motor-generador siempre están sujetos a perturbaciones físicas estructurales lo que ocasiona la aparición ruido y vibración, se recomienda el rediseño de la parte estructural para un acoplamiento eficiente entre el motor y el generador, así como un sistema de nivelación adecuado para mitigar cualquier ruido y pérdidas presentes en el módulo motor-generador.
- Para el estudio de sistemas completos de potencia, es decir, control, generación y distribución, particularmente para la etapa de control, el variador de frecuencia utilizado en el presente trabajo cuenta con la opción de control externo permitiendo el control de la etapa de generación por métodos como SCADA.

## Bibliografía

- ANSI/NEMA MG 1. (2016). *Motors and Generators Supplements*.
- Arias Calle, F. S., & Bravo López, A. S. (2016). Estudio para la modernización de la Central Hidroeléctrica Saucay. *Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico*. Universidad de Cuenca, Cuenca.
- Boldea, I. G. (2016). *Synchronous Generator*. New York: Taylor & Francis Group.
- Chapman, S. J. (2012). *Maquinas Eléctricas* (Quinta ed.). Mexico: The McGraw-Hill.
- Chimarro Alomoto, A. P. (2019). Trabajo de titulación previo a la obtención del título de ingeniera eléctrica. *Interfaz gráfica para el monitoreo de la operación en estado estable de las unidades de generación eléctrica de la central coca codo sinclair*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- CONELEC. (2013). PPlan Maestro de Electrificación 2013-2022. In CONELEC, *Perspectiva y expansión del sistema eléctrico Ecuatoriano* (p. 55). Ecuador.
- Cummins. (2007). *slideplayer.es*. Retrieved from Sistemas de generadores de excitación: <https://slideplayer.es/slide/17103/>
- Fernández Diego, I., & Robles Díaz, A. R. (2012). El Generador Síncrono. *Centrales de Generación Eléctrica*. Universidad de Cantabria, Cantabria.
- Gallego Rendón, R. A., Escobar Zuluaga, A. H., & Granda Echeverri, M. (2016). Flujo de carga en sistemas de transmisión Modelamiento y análisis. *Coleccion Textos Académicos Facultad de Tecnología*. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- Geoff Klempner, I. K. (2018). *The Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance*. United States of America.: IEEE.
- Gerrero Hernández, A., Araque Gallardo, J., & Gallo Nieves, M. (2016). Implementación de módulos didácticos para sistemas electrónicos de potencia. *Revista Educación en Ingeniería*, 9-13.

- IEEE 115. (2009). *IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines*. New York: IEEE.
- IEEE 43. (2013). *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*. Nueva York: IEEE.
- Inmaculada Fernández, D., & Robles Díaz, A. R. (2017). *opencourseware*. Retrieved from opencourseware:  
<https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1160/course/section/1407/bloque-energia-II.pdf>
- Izquierdo Franco, J. (2002). Estudio de flujos de potencia y analisis de fallas en sistemas eléctricos de distribución radial. *Estudio de flujos de potencia y analisis de fallas en sistemas eléctricos de distribución radial*. Universidad Autonoma de Nuevo León, San Nicolas de los Garza, Mexico.
- Leroy Somer, Nidec. (2018). *Wind Turbine Generators*.
- López-Rey García-Rojas, Á. (2016). Influencia del marco regularorio en la implantación de la generación distribuida. *Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales*. Universidad Nacional de Educación a Distancia , España.
- Ninazunta Anaguano, J. A. (2019). Estimación de estado dinámico de un generador sincrónico aplicando la técnica del filtro Kalman extendido. *Proyecto previo a la obtencion del título de ingeniero en electrónica y control*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Orjuela Tirano, L. F., & Cortés Bolívar, J. D. (2020). Estimación de los parámetros del generador síncrono del módulo TNA a partir de oscilogramas eléctricos. *Trabajo de grado para optar por el título profesional de Ingenirero Electricista*. Universidad La Salle, Bogotá.
- Ortiz Boada, A. F., & Viteri Navarrete, F. A. (2014). Estudio, diseño e implementación de un nuevo sistema de protección eléctrica para el motor síncrono de 3Mw-4.14Kv del molino de bolas de crudo de la fabrica de cemento Holcim Ecuador- Planta

- Guayaquil. *Tesis previa a la obtencion del título de Ingeniero Electrico*. Universidad Politecnica Salesiana, Guayaquil.
- Ramírez Medina, H. J., & Sánchez Barroso, R. G. (2012). Diseño y Contrucción de un tablero de tranferencia y sincronización de generdpres de emergencia con PLC y pantalla táctil. *Tesis de grado previa a la obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento*. Escuela Sueprior Plitécnica de Chimborazo, Riobamba.
- REGLAMENTO DE REGIMEN ACADEMICO CONSEJO. (2017, 22 de marzo). *Resolución del Consejo de Educación Superior 51*. Ecuador: Registro Oficial Edición Especial. Retrieved from <https://www.ces.gob.ec/lotaip/Anexos%20Generales/a3/Anexo-lit-a3-R-R%C3%A9g-Acad%C3%A9mico.pdf>
- Rodríguez Chicaiza, D. A. (2008). Graficación en tiempo real de curvas de capacidad de generadores sincrónicos en sistemas de potencia. *Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero Eléctrico*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Rodríguez Pozuela, M. A. (2015). Máqunas Síncrona. *Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética*. Universidad de Catambria, Catambria.
- Rodríguez Pozueta, M. (2012). Tranformadores. *Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética*. Universidad de Cantabria, Cantabria, España.
- Rodríguez Pozueta, M. A. (2014). Maquina síncrona funcionamiento en red aislada en potencia infinita y en paralelo con otras. Motor Síncrono. *Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética*. Universidad de Cantabria, Cantabria.
- Romero Guavita, J., & Núñez Eguis, M. (2017). Tecnología en Electricidad. *Generador Síncrono*. Universidad Distrital Francisco José de Cladas, Caldas, Colombia.
- Tebiana, H. (2014). Dynamic State Estimation in Power Systems. *Master of engineerieng Faculty of Engineering and Applied Science*. Memorial University, Newfoundland.
- Tonato Muñoz, J. P. (2020). Manual operación y mátenimiento eléctrico del generador síncrono de una unidad de generación del la Central Hidroeléctrica Paute

Sopladora. *Proyecto técnico con enfoque general*. Universidad politécnica Salesiana sede Cuenca, Cuenca, Ecuador.

Universidad José Matias Delgado. (2015). *webquery.ujmd.edu.sv*. Retrieved from <https://webquery.ujmd.edu.sv/siab/bvirtual/Fulltext/ADLD0000526/Capitulo%202.pdf>

Universidad Técnica del Norte. (2019, 11 de enero). *Resolución Nro. 001-073-CEAACES-2013-13*. Slider legislacion UTN. Retrieved from <http://www.utn.edu.ec/legislacion/?cat=2>

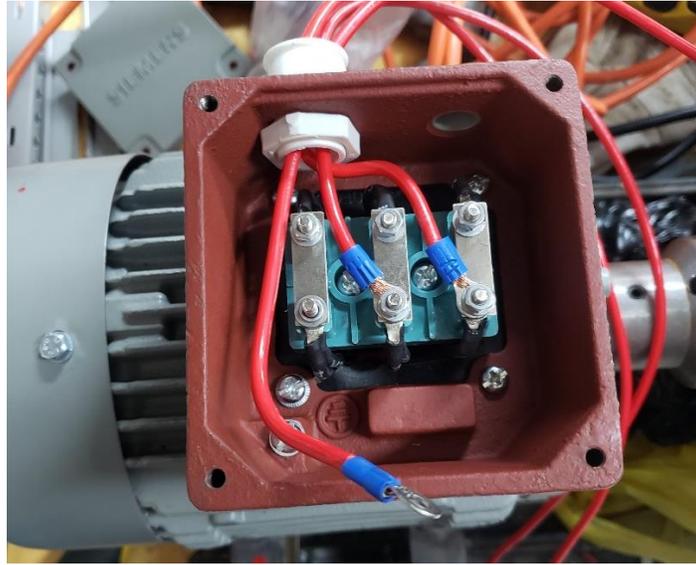
Valenzuela Santillán, A. (2013). Sincronoscopio virtual para un sistema multtimáquina del laboratotio de sistemas electros de potencia. *Proyecto previo a la obtencion del título de ingeniero eléctrico*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

## Anexos

Anexo A Instalación de las borneras de los terminales del generador



Anexo B Instalación de las borneras de los terminales de motor principal



Anexo C Proceso de mantenimiento del generador síncrono



Anexo D Proceso de construcción del módulo



Anexo E Manual del variador de frecuencia

<https://nicontrols.com/media/pdfs/altivar31-programming-manual-spanish.pdf>

Anexo F Catalogo del motor Jaula de ardilla

<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:782b04d0-82f4-488a-936b-514cd8bb5d5f/version:1580149154/arteimpresioncatalogosimotics.pdf>

La construcción de cualquier módulo necesariamente debe tener un manual de mantenimiento con el propósito de identificar las revisiones que el operario debe hacer previo al trabajo para propiciar el alargue la vida útil de módulo así mismo un manual de operación para el usuario que permite operar sin mayor problema e identificar cualquier topología desconocida en el tablero de control y el módulo en general.

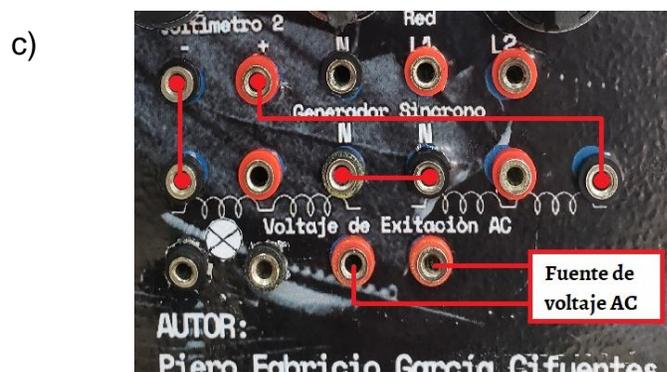
Se debe verificar algunos aspectos en módulo antes de su operación para evitar posibles problemas en el funcionamiento. En esta sección se explica detalladamente la operación del módulo motor-generator eléctrico con el objetivo que el operario pueda utilizarlo con facilidad y sin peligro.

Para operar el módulo de manera efectiva y correcta se necesita cumplir instrucciones necesarias. Antes de cualquier practica se debe establecer que modelo de trabajo del generador ya sea aislado o en acoplamiento en barra infinita.



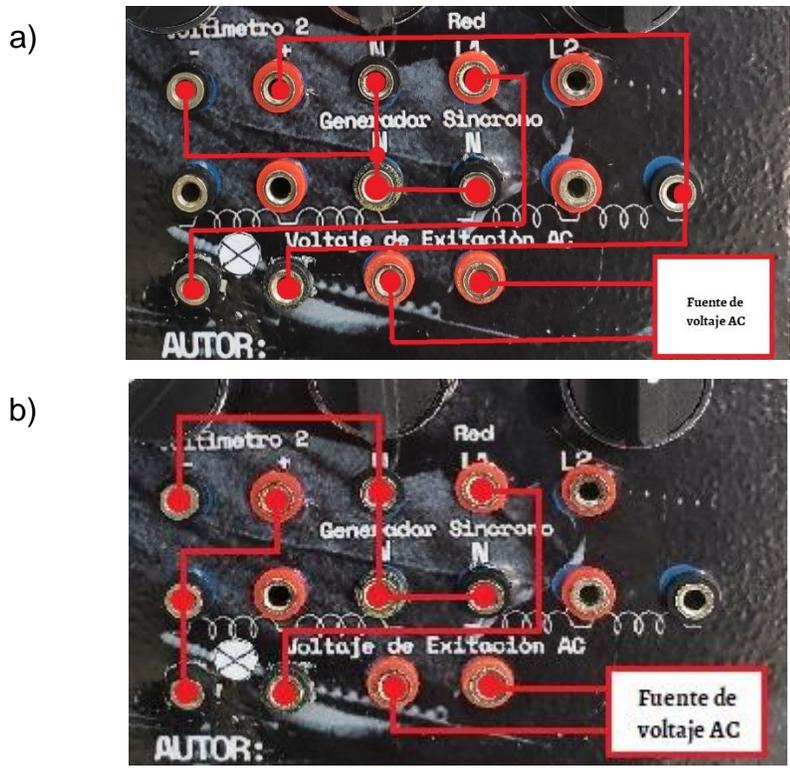
En cualquiera de los dos modelos de trabajo es necesario conectar el variador de voltaje en los terminales de “Voltaje de Excitación AC”.

1. En caso de optar por el modelo de trabajo con el generador aislado se debe conectar los devanados del generador al igual que los terminales del “Voltímetro 2”.



Los esquemas anteriores muestran las conexiones del generador para entregar 120V de voltaje de fase de la primera fase, 120V de voltaje de fase de la segunda fase y 240V de voltaje de línea respectivamente, para el acoplamiento en red aislada de una fase del generador.

2. Si se opta por el modelo de trabajo con el generador acoplado en barra infinita es necesario realizar las conexiones en los devanados a elección, internamente el voltímetro de red y el contactor están conectados a la línea 1 de la red.



Los esquemas anteriores muestran las diferentes conexiones de acoplamiento a la barra infinita de las fases del generador y de la red.

- Para el acoplamiento de frecuencias se debe conectar la lampara a los terminales de salida L1 y de cualquiera de las bobinas presentes en el generador
- El “Voltímetro 2” se conecta a las salidas de la bobina del generador elegida
- La lampara de sincronización debe conectarse a la salida de la fase del generador seleccionada y el otro extremo de la lampara a la fase de la red a sincronizar

En cualquier maniobra con el módulo se debe verificar que el enchufe conector de la fuente de alimentación esté conectado a 220v necesariamente y respete las conexiones fase-fase-neutro.



Una vez realizadas las conexiones del modelo de operación se enciende el equipo con el selector “ON/OFF”.



El control de la frecuencia del motor primario y la del generador se lo realiza configurando el variador de frecuencia en modo manual para poder variar la frecuencia con las botoneras presentes en el panel de configuración de la siguiente forma:

Menú (SuP-): rFr



Una vez configurado el variador de frecuencia se activa el selector “RUN MOTOR1”

Finalmente, el selector “CONTACTOR 1” conecta la línea 1 de la red eléctrica con el devanado elegido.

El módulo necesita un mantenimiento preventivo para evitar ciertos desperfectos en su funcionamiento futuro, dicho mantenimiento es crucial en el generador síncrono y el motor principal debido a condiciones físicas como lo es el desplazamiento de sus ejes, siempre se debe tener en cuenta las siguientes condiciones para el mantenimiento.

- Verificación del ajuste de los pernos que sujetan al generador, al motor, a la estructura y a la caja de control en caso de problemas realizar el reajuste necesario.
- Verificar que el acople entre el motor y el generador este bien alineado, nunca deberá estar a desnivel debido a que esto malogrará a las maquinas rotativas, en caso de presentar desalineaciones, realizar la respectiva alineación.
- Verificar la integridad de los conductores, empalmes, borneras y puntos de conexión entre los cables y los equipos y materiales eléctricos de todo el circuito.
- Limpiar la suciedad como el polvo de las placas del sistema de control y de las maquinas rotativas.