



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y
APLICADAS
INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**ANÁLISIS DE LA CURVA DE CAPABILIDAD PARA LA OPERACIÓN DE UNA
UNIDAD MOTOR GENERADOR AC-AC CONECTADO A LA BARRA Y AISLADO.**

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico en
sistemas Eléctricos de potencia

Autores:

Estrada Lapo Kevin Jeancarlo

Sisalema Moposita Jonathan Efrain

Tutor académico:

Ing. Carlos Ivan Quinatoa Caiza

LATACUNGA-ECUADOR

2022



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

“Yo **ESTRADA LAPO KEVIN JEANCARLO** y **SISALEMA MOPOSITA JONATHAN EFRAIN**, declaramos ser autores de la presente propuesta de investigación: “**ANÁLISIS DE LA CURVA DE CAPABILIDAD PARA LA OPERACIÓN DE UNA UNIDAD MOTOR GENERADOR AC-AC CONECTADO A LA BARRA Y AISLADO**”, siendo el **ING. MSC. CARLOS IVÁN QUINATOA CAIZA** tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Estrada Lapo Kevin Jeancarlo

C.I. 1718109463

Sisalema Moposita Jonathan Efrain

C.I. 1805120977



AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: **“ANÁLISIS DE LA CURVA DE CAPABILIDAD PARA LA OPERACIÓN DE UNA UNIDAD MOTOR GENERADOR AC-AC CONECTADO A LA BARRA Y AISLADO”**, de los señores **ESTRADA LAPO KEVIN JEANCARLO** y **SISALEMA MOPOSITA JONATHAN EFRAIN**, de la carrera **INGENIERÍA ELÉCTRICA**, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, marzo 2022

Tutor de Titulación

Ing. MSc. Carlos Quinatoa

C.I. 0503287864



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la facultad de ciencias de la ingeniería y aplicadas; por cuanto los postulantes : **ESTRADA LAPO KEVIN JEANCARLO** y **SISALEMA MOPOSITA JONATHAN EFRAIN**, con el título de proyecto de titulación: “**ANÁLISIS DE LA CURVA DE CAPABILIDAD PARA LA OPERACIÓN DE UNA UNIDAD MOTOR GENERADOR AC-AC CONECTADO A LA BARRA Y AISLADO**”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación de proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, marzo 2022

Para constancia firman:

Ing. Pacheco Mena Carlos Francisco

C.C. 050307290-2

Ing. León Segovia Marco Aníbal

C.C. 050230540-2

Ing. Cruz Panchi Luis Rolando

C.C. 050259517-6

AGRADECIMIENTO

Primero, agradezco a Dios por darme la vida y salud que es necesario para realizar los objetivos que cada ser humano tiene en la vida y guiarme para ser una persona de bien y responsable en cada una de mis actividades.

A mi familia por ser el eje fundamental en mi vida y a mis seres cercanos que de una u otra manera me han apoyado en esta etapa de vida, quienes con amor, paciencia y sabiduría me motivan día a día para seguir adelante y culminar las metas que me propongo en la vida.

A mis profesores de la institución, por el conocimiento impartido durante el paso por los salones de clase de esta importante institución.

Estrada Kevin

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios por darme la salud y vida por protegerme y guiarme en todo mi ámbito estudiantil logrando fortalecerme y dándome sabiduría para conseguir culminar una meta más.

Doy gracias a mi padre Reinaldo Sisalema y a mi hermosa madre Mariana Moposita por ser los pilares más importantes en mi vida, porque sin ellos no estaría aquí forjándome como un profesional y como un hombre de bien y por enseñarme el respeto la humildad y el trabajo honesto.

A mis hermanas Nicole, Yesly y Mia les doy gracias por ser mi gran motivación de cada día por alegrarme y apoyarme para poder seguir adelante a pesar de los obstáculos que se me presento en la vida

A mi tía Alicia a mi primo Andrés y mis primas Fernanda y Kristyna que siempre me han apoyado desde niño y por aconsejarme con un jalón de orejas.

A mi familia y amigos

Sisalema Jonathan

DEDICATORIA

Dedico con todo el amor a mis abuelos quien han sido como unos padres para mí y mis hermanos, también, a mis padres que con todo su esfuerzo me han ayudado a realizar el sueño de convertirme en un profesional y, por último, a mis hermanos que con sus consejos y apoyo moral siempre han estado conmigo para superar cualquier dificultad surgida durante mi proceso académico.

Estrada Kevin

DEDICATORIA

Dedico con mucho esfuerzo y corazón a esta tesis a mi familia, por apoyarme y por confiar en mí y por darme siempre su apoyo incondicional.

A mi padre Reinaldo Sisalema que me enseñó a luchar y sacrificarme por lo que uno quiere en la vida a pesar de que aparenta ser fuerte tiene un corazón bueno y noble porque siempre estuvo apoyándome y guiándome para poder alcázar mis propósitos y metas en la vida.

A mi querida y hermosa madre Mariana Moposita quien fue la mujer que me dio la vida, con su apoyo sus consejos sus preocupaciones me enseñaron a dar lo mejor de mí a luchar y alcanzar cada uno de mis sueños.

A mis hermanas a pesar de que estén pequeñas con cada sonrisa que sacan en mí me motivan a ser mejor que ayer por sus locuras y su apoyo.

Sisalema Jonathan

ÍNDICE GENERAL

1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN	2
2.1. EL PROBLEMA:	2
2.1.1. Situación problemática:	2
2.1.2. Formulación del problema:.....	3
2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	3
2.2.1. Campo de acción	3
2.3. BENEFICIARIOS:	3
2.3.1. Beneficiarios directos:	3
2.3.2. Beneficiarios indirectos:	3
2.4. JUSTIFICACIÓN:	3
2.5. HIPÓTESIS	4
2.6. OBJETIVOS	4
2.6.1. General:	4
2.6.2. Específicos:.....	5
2.7. SISTEMA DE TAREAS	5
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	6
3.1. ANTECEDENTES	6
3.2. MARCO CONCEPTUAL REFERENCIAL	7
3.2.1. Generador eléctrico.....	7
3.3. Máquinas síncronas	9
3.4. Potencia de generación activa y reactiva.....	10
3.5. Operación en los cuatro cuadrantes	12
3.6. Tipos de generadores	13
3.6.2. Circuito equivalente del generador síncrono	15
3.6.3. Partes del generador sincrónico	17

3.7. Sistema de excitación de los generadores síncronos.	19
3.8. Pérdidas en los generadores síncronos.	20
3.9. Generador de polos lisos y polos salientes	21
3.9.1. Generador de polos lisos (rotor cilíndrico).....	21
3.9.2. Generador síncrono de polos salientes	23
3.10. Límites de operación del generador sincrónico	26
3.10.1. Corriente de armadura máxima	26
3.10.2. Corriente de campo máxima.....	27
3.10.3. Potencia máxima	28
3.10.4. Estabilidad en régimen permanente.....	28
3.10.5. Pruebas eléctricas del generador síncrono.....	29
4. METODOLOGÍA.....	33
4.1. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN	33
4.1.1. Método deductivo	33
4.1.2. Método experimental.....	33
4.1.3. Método científico.....	34
4.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	34
4.3. TIPOS DE INVESTIGACIÓN.....	34
4.3.1. Investigación de campo	34
4.3.2. Investigación bibliográfica	34
4.3.3. Investigación descriptiva	35
4.4. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS	35
4.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.	36
4.5.1. Normativa	38
4.5.2. Desarrollo de la aplicación	38
5. ANÁLISIS Y RESULTADOS	39
5.1. Determinar los parámetros del generador síncrono en estado estable.....	41

5.1.1. Prueba del circuito abierto del generador síncrono	41
5.1.2. Prueba de cortocircuito en el generador síncrono	44
5.2. Cálculo de la reactancia síncrona del eje directo del generador.....	46
5.3. Cálculo de la reactancia síncrona del eje cuadratura del generador	47
5.4. Límites de operación del generador síncrono.....	49
5.5. Límites mecánicos para el diseño de la curva de capacidad	51
5.5.1. Potencia máxima de la máquina motriz (Motor).....	51
5.5.2. Potencia mínima de la máquina motriz (Motor).....	51
5.5.6. Límites eléctricos para la curva de capacidad.....	52
5.5.7. Límite de corriente en los devanados de armadura	52
5.5.8. Límite máximo de la corriente en los devanados	53
5.5.9. Límite mínimo de corriente de campo.....	54
5.5.10. Límite en estado estable	55
5.6. Diagrama de flujo para la realización de la curva de capacidad	57
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
6.1. Conclusiones.....	64
6.2. Recomendaciones	65
7. BIBLIOGRAFÍA	66
8. ANEXOS	69

ÍNDICE GENERAL DE TABLAS

Tabla 2.1. Descripción de las actividades.....	5
Tabla 3.1 Condiciones de operación de las máquinas síncronas.....	13
Tabla 4.1. Características de la curva de capacidad.....	36
Tabla 4.2. Características de la unidad motor generador	36
Tabla 4.3. Características del multímetro	37
Tabla 4.4. Características del multímetro	38
Tabla 5.1. Datos de placa del generador.....	40
Tabla 5.2. Valores de las pruebas realizadas en vacío.....	42
Tabla 5.3. Valores de las pruebas en cortocircuito.....	45
Tabla 5.4. Características para el cálculo de la reactancia en cuadratura (X_q).....	48
Tabla 5.5. Valores resultantes de la reactancia del eje de cuadratura.	48
Tabla 5.6. Datos obtenidos de las pruebas del generador.....	49

ÍNDICE GENERAL DE FIGURAS

Figura 3.1. Diagrama esquemático del generador síncrono .	9
Figura 3.2. Máquina síncrona de polos salientes	10
Figura 3.3. Triángulo de potencias (S, Q, P).	11
Figura 3.4. Cuadrantes de operación de una máquina síncrona	13
Figura 3.5. Estator y carcasa de la máquina asíncrona o de inducción .	14
Figura 3.6. Generador sincrónico de polos salientes	15
Figura 3.7. Circuito equivalente del generador síncrono.	16
Figura 3.8. Rotor del generador síncrono	17
Figura 3.9. Carcasa del estator	18
Figura 3.10. Circuito del sistema de excitación	20
Figura 3.11. Generador de polos lisos (rotor cilíndrico)	21
Figura 3.12. Diagrama fasorial del generador síncrono de rotor cilíndrico	22
Figura 3.13. Aspectos constructivos rotor	24
Figura 3.14. Diagrama fasorial del generador sincrónico	24
Figura 3.15. Corriente máxima de armadura	26
Figura 3.16. Límite de excitación máxima del generador síncrono .	27
Figura 3.17. Circuito equivalente por fase de un generador síncrono	29
Figura 3.18. Diagrama de prueba de circuito abierto de generador síncrono.	31
Figura 3.19. Curvas características en vacío del generador síncrono	31
Figura 3.20. Diagrama de prueba en cortocircuito.	32
Figura 4.1. Diagrama de flujo de la aplicación en Matlab.	35
Figura 4.2. Partes de una pinza amperimétrica	36
Figura 4.3. Multímetro digital Fluke 115	37
Figura 5.1. Conexión de los elementos para la toma de datos en vacío o circuito abierto.	42
Figura 5.2. Curva del circuito abierto con respecto al entre hierro.	43
Figura 5.3. Conexión de los elementos para la toma de datos en cortocircuito.	44
Figura 5.4. Curva del generador síncrono en cortocircuito.	46
Figura 5.5. Curvas del circuito abierto y circuito cerrado.	47
Figura 5.6. Es una representación de la potencia máxima y mínima.	52
Figura 5.7. Límite geométrico del calentamiento del estator.	53
Figura 5.8. Límite geométrico máximo del calentamiento del rotor.	54
Figura 5.9. Límite geométrico mínimo de la corriente de campo.	55

Figura 5.10. Límite geométrico del margen en estado estable.	57
Figura 5.11. Diagrama de flujo.....	58
Figura 5.12. Ventana de inicio de la simulación.	59
Figura 5.13. Obtener datos de los campos de texto.....	59
Figura 5.14. Ventana para el ingreso de datos característicos del generador.....	60
Figura 5.15. Conversión a sistema por unidad.	60
Figura 5.16. Generación de gráficas.....	61
Figura 5.17. Formato para diferenciar líneas y curvas mostradas.	62
Figura 5.18. Límites en la curva de capacidad.	63
Figura 5.19. Diagrama fasorial resultante de Matlab	64

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS

TOPIC: " CAPACITY CURVE ANALYSIS FOR AN AC-AC MOTOR-GENERATOR UNIT OPERATION CONNECTED TO THE BAR AND INSULATED".

Autores:

Estrada Lapo Kevin Jeancarlo

Sisalema Moposita Jonathan Efrain

RESUMEN

En este proyecto de investigación se analizaron los límites de operación de una unidad motor generadora AC-AC para tener un óptimo funcionamiento del generador mediante la carta y límites de operación que presenta un generador síncrono, debido a que estas dan las condiciones para los límites de operación, las pruebas realizadas a la máquina se las realizaron en cortocircuito y circuito abierto o en vacío para determinar las reactancias del generador (reactancia en eje directo y reactancia en eje de cuadratura) para la ejecución de la gráfica de la curva de capacidad, esta gráfica se la realiza en un plano cartesiano partiendo de un diagrama fasorial de potencias, estas son activa y reactiva, a esta curva también se la denomina como diagrama de límite térmico debido a que determina el valor al cual el generador, sus bobinados y núcleos alcanzan la temperatura máxima de operación en estado estable, para obtener la gráfica se utilizó el software Matlab, el cual contiene en sus librerías GUIDE que sirvió para la importación y exportación de datos para la ejecución de la carta de operación del generador, esto se logró desarrollar en base a las pruebas realizadas al generador síncrono, la gráfica que presenta aumenta el régimen de operación con respecto al factor de potencia, es decir, el régimen de operación incrementa cuando el factor de potencia se acerque a la unidad.

Palabra claves: Límites de operación, máquina síncrona, pruebas de cortocircuito y circuito abierto, curvas de capacidad.

COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY
ENGINEERING SCIENCES AND APPLIED FACULTY

TOPIC: " CAPACITY CURVE ANALYSIS FOR AN AC-AC MOTOR-GENERATOR UNIT OPERATION CONNECTED TO THE BAR AND INSULATED".

Authors:

Estrada Lapo Kevin Jeancarlo

Sisalema Moposita Jonathan Efrain

ABSTRACT

This research project was analyzed the operation limits an AC-AC motor generator unit to have an generator optimal operation, through the chart and operation limits, what presents a synchronous generator, due to these give the conditions for operation limits, the made tests on the machine were performed into short circuit and open circuit or in vacuum to determine the generator reactances (reactance into direct axis and reactance in the quadrature axis), for the capacity curve graph execution, this graph is made on a cartesian plane, starting from a power phasor diagram, these are active and reactive, this curve is also called a thermal limit diagram, due to it determines the value, which the generator, its windings and cores reach the maximum operating temperature into a stable state, to get the graph, was used the Matlab software, what contains GUIDE into its libraries, which served to import and export data for generator operation chart execution, this was achieved to develop based onto made tests to the synchronous generator, the graph, what it presents increases the operating regime with respect to power factor, that is, the operating regime increases, when the power factor approaches the unit.

Keywords: Operating limits, synchronous machine, short-circuit and open circuit tests, capability curves.

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del trabajo de titulación cuyo título versa: **“ANÁLISIS DE LA CURVA DE CAPABILIDAD PARA LA OPERACIÓN DE UNA UNIDAD MOTOR GENERADOR AC-AC CONECTADO A LA BARRA Y AISLADO.”** presentado por: **Estrada Lapo Kevin Jeancarlo y Sisalema Moposita Jonathan Efrain**, estudiantes de la Carrera de **Ingeniería Eléctrica** perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas** lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, 21 marzo del 2022

Atentamente,



CENTRO
DE IDIOMAS

Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC
CI: 0502666514

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título: Análisis de la curva de capacidad para la operación de una Unidad Motor Generador AC-AC conectado a la barra y aislado.

Fecha de inicio: 29 octubre 2021

Fecha de finalización: 15 febrero 2022

Lugar de ejecución: Universidad Técnica de Cotopaxi – Campus La Matriz.

Facultad que auspicia: Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

Carrera que auspicia: Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Equipo de Trabajo: Sistemas Eléctricos de Potencia

Equipo de Trabajo:

Tutor:

Ing. Msc. Carlos Iván Quinatoa Caiza

Estudiantes:

Estrada Lapo Kevin Jeancarlo

Sisalema Moposita Jonathan Efrain

Área de Conocimiento: Máquinas Eléctricas

07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y energía

Línea de investigación:

Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

Sublíneas de investigación de la Carrera:

Sublínea 3: Conversión y uso racional de la energía eléctrica.

Grupos Temáticos:

1. Generación con fuentes convencionales y no convencionales.
2. Eficiencia energética y desarrollo sostenible.

2. INTRODUCCIÓN

El presente documento detalla el análisis de la curva de capacidad para la operación de una unidad Motor Generador AC-AC conectado a la barra y aislado, siendo estos unos de los elementos que conforman un SEP desde la generación y así pasando por líneas de transmisión hasta llegar a los diferentes usuarios.

Desde un punto de vista práctico, para facilitar la comprensión del funcionamiento de los generadores síncronos, se ha descrito y presentado un conjunto de métodos analíticos y gráficos, dando lugar, aquellos que radican a partir de distintas variables, tales como, mecánicas, eléctricas, magnéticas, térmicas e incluso de ruido audible; en el presente proyecto se expresa la operación en estado estable, y la realización de pruebas eléctricas para la obtención de los parámetros del generador síncrono.

Para el diseño de la simulación se trabajará en un lenguaje programable a través de la aplicación Matlab, la misma que, nos propone facilidades, así como, el proceso propio de un lenguaje de programación. En el caso actual, para dar inicio a la representación gráfica del diagrama de operación o curva de capacidad, se ve influenciada por diferentes ecuaciones, dando lugar a una respuesta exacta en sus límites de operación.

2.1. EL PROBLEMA:

2.1.1. Situación problemática:

Los generadores síncronos son los elementos más importantes dentro de una central de generación por lo cual se debe llevar un control adecuado de sus parámetros eléctricos como: la temperatura en sus bobinados tanto en el rotor como en el estator, aislamiento en sus bobinados, potencias máximas y mínimas, velocidad, frecuencia, tensión y corriente, por ende, al realizar un control adecuado de este parámetro mantiene en óptimas condiciones a la máquina.

Para el control de estos parámetros es necesario su curva de capacidad que consiste en obtener una región de operación quien es restringida por el límite de corriente de armadura, límite de corriente de campo, límite de estabilidad en estado estable, límite de calentamiento del estator y el límite de potencia activa del generador.

Entonces, para obtener la curva de capacidad es necesario obtener las reactancias de cuadratura y de eje directo, potencia aparente nominal, tensión nominal y su respectivo factor de potencia, además, se necesita el diagrama fasorial de la potencia activa y reactiva y los datos de placa propuesta por los fabricantes.

Consecuentemente en este proyecto de investigación se desarrollará la curva de capacidad del generador síncrono mediante una herramienta computacional de lenguaje de programación MATLAB, para poder analizar la región de operación del generador síncrono.

2.1.2. Formulación del problema:

¿De qué manera influye la elaboración de la curva de capacidad de un generador síncrono de corriente alterna (AC-AC) conectado a la barra y aislado?

2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

Curva de capacidad de una Unidad Motor Generador

2.2.1. Campo de acción

330000 Ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 330602 Aplicaciones Eléctricas

2.3. BENEFICIARIOS:

2.3.1. Beneficiarios directos:

Los estudiantes y docentes de las carreras de Ingeniería Eléctrica en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

2.3.2. Beneficiarios indirectos:

Además, en esta propuesta investigativa se presentan como beneficiarios indirectos los docentes de la carrera a fin y estudiantes de distintas carreras.

2.4. JUSTIFICACIÓN:

El comportamiento de los generadores síncronos está correlacionado debido a los cambios permanentes de la carga, resultando en un cambio constante en el punto de operación del motor,

las herramientas básicas para el pronóstico de carga y los cambios de "punto de operación" son la evaluación operativa de las curvas de capacidad de potencia del generador síncrono, es decir, saber, entre otras cosas, diagramas de trayectoria límites de corriente de campo, corrientes de estator, límites mínimo y máximo, límites de sobrecarga o calentamiento del cabezal, límites prácticos y teóricos para la estabilidad, luego límites para la operación Generador síncrono.

La curva de capacidad o también conocida como curva de capacidad está basada en un diagrama fasorial de potencias de una máquina síncrona (generador síncrono), da las características de operación de un alternador de corriente alterna en condiciones paralelas ante una red infinita, donde se muestra el procedimiento del generador con sus limitaciones; es decir, en el bobinado en el estator existe calentamiento de dicho bobinado y del rotor, el eje del motor primo que mueve al alternador el cual tiene una capacidad de generación donde forma la parte magnética del generador limitándola para obtener una potencia máxima.

En el presente proyecto, se diseñará una simulación que permita visualizar la curva de capacidad de un generador síncrono para su pertinente análisis y determinar su comportamiento ya que este comprende fundamentalmente de condiciones en estado estable y se debe tomar en cuenta las limitaciones que puede proporcionar el generador ya que puede generar o absorber potencia reactiva.

2.5. HIPÓTESIS

La curva de capacidad ayuda a operar dentro de los límites la unidad motor generador conectado a la barra y aislado.

2.6. OBJETIVOS

2.6.1. General:

Obtener la curva de capacidad mediante los parámetros eléctricos del generador para el análisis de la curva y la zona de operación de una unidad motor generador AC-AC conectado a la barra y aislado.

2.6.2. Específicos:

- Fundamentar de forma teórica y científica sobre la curva de capacidad y la operación de una Unidad Motor Generador.
- Determinar la curva de capacidad utilizando las pruebas de cortocircuito y circuito abierto para la operación de una unidad motor generador AC-AC a partir de una simulación.
- Simular en el Software Matlab la curva de capacidad de una unidad motor generador para verificar el funcionamiento del generador síncrono.

2.7. SISTEMA DE TAREAS

Estas actividades se realizarán para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos específicos planteados.

Tabla 2.1. Descripción de las actividades.

Objetivo específico	Actividad (tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Fundamentar de forma teórica y científica sobre la curva de capacidad y la operación de una Unidad Motor Generador.	Descripción y funcionamiento de la máquina síncrona y sus límites de operación.	Obtención de información relevante de la máquina síncrona.	Revisión documental: sitios web, libros.
Determinar la curva de capacidad utilizando las pruebas de cortocircuito y circuito abierto para la	Investigación de las restricciones necesarias para el óptimo funcionamiento de un motor generador.	Si el generador trabaja a la potencia nominal la máquina puede generar o	sitios web, libros y sobre todo artículos científicos

operación de una unidad motor generador AC-AC a partir de una simulación.		absorber potencia reactiva.	-Pruebas eléctricas en el generador síncrono.
Simular en el Software Matlab la curva de capacidad de una unidad motor generador para verificar el funcionamiento del generador síncrono.	Diseño e ingreso de datos para simular la curva de capacidad de un generador síncrono.	Visualización de las características del generador, de los límites térmicos de su operación.	Software Matlab. Utilizando la librería GUIDE.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. ANTECEDENTES

En la Universidad Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Eléctrica se realizó el “Diseño e implementación de software para la determinación dinámica de las curvas de operación de generadores sincrónicos de Colbún S.A”, este proyecto se basa en la implementación de un software que permita la creación de una carta de operación para una máquina sincrónica con el fin que el operador pueda maniobrar y visualizar de mejora manera los límites de la máquina sincrónica de manera eficiente [1].

En la actualidad las máquinas síncronas han evolucionado teniendo un papel muy importante, debido a la posibilidad de poder controlar la velocidad mediante convertidores electrónicos de potencia, las máquinas actuales están remplazando a las máquinas de corriente continua debido a que la principal desventajas es la eliminación del controlador electromecánico como su eficiencia y es por eso que se utiliza más las máquinas sincrónicas de imán permanente y de reluctancia,

debido a que no necesitan una fuente externa de excitación para alimentar los devanados del rotor y presentado pérdidas bajas [2].

Desde el siglo XIX el desarrollo de las máquinas eléctricas han tenido un cambio muy drástico en el transcurso del tiempo, el cual con el pasar del tiempo la tecnología ha ido avanzando, gracias a los aportes significativos que realizaron diversos inventores como Edison y Tesla, entre otros siendo estos los más destacados, logrando la eficacia y eficiencia en la conversión electromecánica de la energía, las máquinas eléctricas poseen características comunes que permiten generalizar la descripción matemática del comportamiento de las mismas a través de diversas herramientas [3].

En un generador síncrono existen límites además de los límites térmicos mecánicos de turbinas y límites operativos por el sistema de potencia, la limitación de los componentes eléctricos tiene en cuenta las limitaciones de calentamiento de los devanados del estator y del rotor, mientras limita el tipo mecánico lo impone el dispositivo transformado, la energía primaria se convierte en energía mecánica, cuando un generador síncrono funciona en estado sub-excitado deben definirse criterios de margen de estabilidad, donde permitirá fuentes de alimentación con baja corriente de campo requerida por el sistema [4].

El sistema es estable cuando al presentarse problemas de origen eléctrico o mecánico el sistema recupera las condiciones de equilibrio en régimen permanente, esto se puede lograr estudiando las curvas de capacidad o de potencia ya que estas definen los límites de operación de generador y a su vez puede los límites de flujo máximo de potencia [4].

3.2. MARCO CONCEPTUAL REFERENCIAL

3.2.1. Generador eléctrico

La principal función de los generadores eléctricos es transformar la energía mecánica ya sea por un motor o una turbina en energía eléctrica, las características y las especificaciones de los generadores deben ser tanto eléctricas y mecánicas entre ellas debe estar: la capacidad del generador, soportes, la temperatura de operación y el nivel de aislamiento, en este ámbito los generadores se presentan como síncronos y asíncronos [5].

Los generadores síncronos son máquinas eléctricas rotativas por tanto sus principales características es la relación directa que se tiene entre: la velocidad de giro del rotor, la frecuencia

del voltaje y la corriente de los generadores, la principal operación de estos generadores tiene una similitud con los transformadores ya que estos se establecen en la ley de Faraday, por lo tanto están compuestos de una estructura magnética para que el campo magnético en el núcleo produce una fuerza electromotriz (f.e.m) en los terminales de los devanados, ya que estos dependen del número de vueltas que forman tanto las bobinas y el flujo generado. Dando como fenómeno la siguiente ecuación [6].

$$e_{ind} = -N \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.1)$$

Donde:

e_{ind} : Voltaje inducido por la bobina

N : Es el número de espiras en el devanado.

φ : Es el flujo magnético variable en el tiempo que circula entorno a la bobina.

3.2.1.1. Partes del generador eléctrico

En la parte eléctrica se puede identificar dos elementos: Devanado de armadura y devanado de campo, en los devanados de armadura las bobinas se interconectan induciendo un voltaje alterno en cambio en el devanado de campo esta trabaja como fuente primaria de flujo magnético [7]

En cambio, en el punto de vista de la estructura mecánica del generador se idéntica dos elementos principales: rotor y estator, el estator en si es una parte fija en donde se encuentra el devanado de armadura, en donde las bobinas se encuentran devanadas en el núcleo, para poder aprovechar la mayor cantidad de flujo magnético, en cambio el rotor es la parte móvil del generador en donde comúnmente el devanado de campo necesita CC para poder producir un campo constante, de tal manera que el rotor este en movimiento, sin embargo la CC se adquiere de un generador extra el cual se encuentra en el mismo eje del generador principal ya que este produce CA y es enviada a un sistema de rectificadores para poder ser procesada al rotor [8].

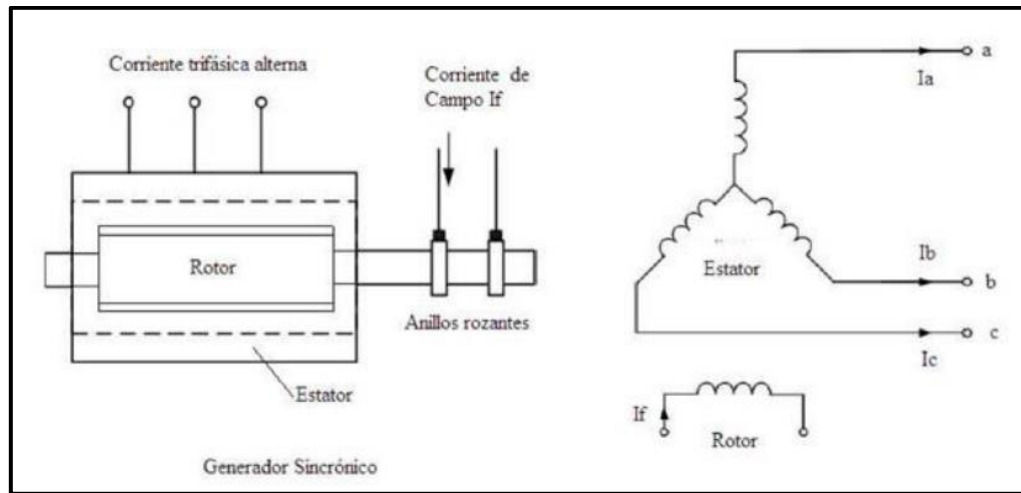


Figura 3.1. Diagrama esquemático del generador síncrono [8].

3.3. Máquinas síncronas

La máquina síncrona opera como un generador de CA excitada por una turbina para convertir la energía mecánica a eléctrica por lo cual es la primordial fuente de generación de potencia eléctrica en el mundo, al momento que funciona como motor, dicha máquina cambia de energía eléctrica en mecánica y esto principalmente, se trata con el generador síncrono [9].

El inducido de un motor síncrono es un devanado de CA monofásico o polifásico típico de un motor de inducción, por lo que el devanado inductivo de este motor funciona con CC y el número de polos de los dos devanados es el mismo, la máquina síncrona se utiliza como generador o un alternador, el motor externo gira su rotor y consecuentemente gira el campo magnético inducido, que se produce por corriente continua, y luego se ve desde el rotor como un campo magnético estático, cuando actúa como motor, su estator es accionado por un sistema de corriente equilibrada, estas corrientes generan un campo magnético giratorio que, al interactuar con el campo magnético inducido, hace que el rotor gire a la misma velocidad, es decir, a velocidad síncrona [10].

Cuando la máquina opera como motor esta gira a la velocidad de sincronismo. Por otra parte, cuando la máquina actúa como alternador o generador trata obtener unas tensiones de frecuencia f , la velocidad de la máquina tienden a ser igual a la velocidad de sincronismo correspondiente a dicha frecuencia f [10].

$$V_s = \frac{120 * f}{n} \quad (3.2)$$

Donde:

V_s : Velocidad síncrona

f : Frecuencia (Hz)

n : Numero de polos

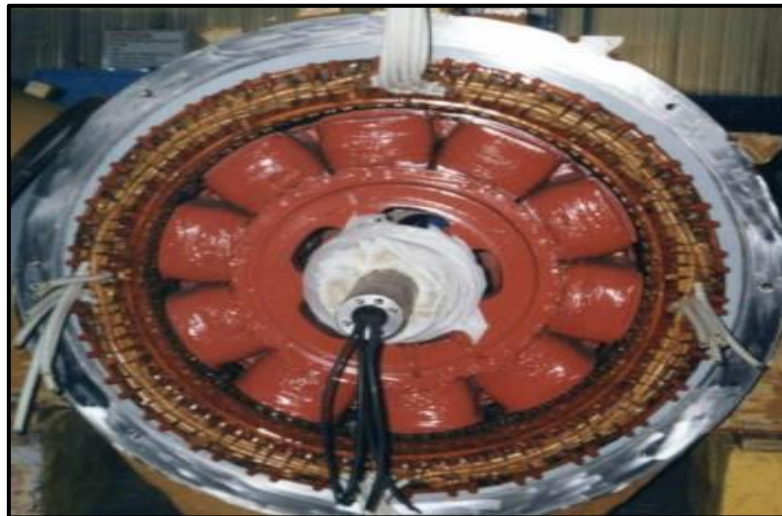


Figura 3.2. Máquina síncrona de polos salientes [10].

3.4. Potencia de generación activa y reactiva

Para el proceso de ecuaciones algebraicas para los límites de operación de máquinas síncronas, se conocen expresiones para la potencia activa y reactiva suministrada por máquinas síncronas de polos saliente conectadas al sistema de potencia, y estas expresiones se derivan de las expresiones vectoriales para potencia aparente [11].

Para hablar de generación de potencia eléctrica se debe entender que es la transformación de potencia mecánica del eje de la máquina del motor primario, mayormente suelen ser a diésel o de vapor, las fuentes a utilizar principalmente deben tener una frecuencia constate, la cual no dependa del generador caso contrario la frecuencia de dicho sistema puede presentar fallas, sin embargo, en la salida de potencia de energía no suele ser la misma que entra ya que presenta pérdidas internas en los devanados [12].

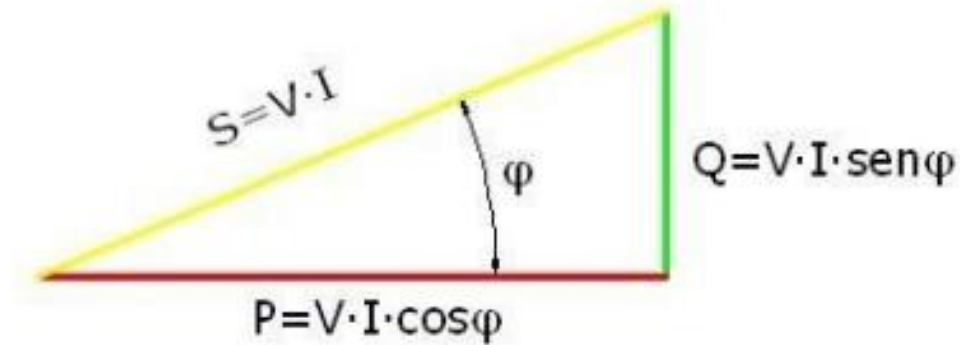


Figura 3.3. Triángulo de potencias (S, Q, P).

En la siguiente expresión se presenta la potencia eléctrica real de salida con términos de voltaje y de las corrientes de línea [12].

$$P_{out} = \sqrt{3} * V * I * \cos\varphi \quad (3.1)$$

Donde:

V : Voltaje de línea a línea

I : Corriente de línea

φ : Ángulo entre voltaje y corriente

La siguiente expresión viene representada de los valores de fase:

$$P_{out} = 3 * V_f * I_f * \cos\varphi \quad (3.2)$$

Donde:

I_f : Corriente respecto a fase

V_f : Voltaje respecto a línea a neutro

φ : Ángulo entre voltaje y corriente

En esta expresión presenta valores de la potencia reactiva generada en función de los términos de fase y de línea [12].

$$Q_{out} = \sqrt{3} * V * I * \sin\varphi \quad (3.3)$$

$$Q_{out} = 3 * V_f * I_f \sin\varphi \quad (3.4)$$

Donde:

V : Voltaje de línea a línea

I : Corriente de línea

φ : Ángulo entre voltaje y corriente

I_f : Corriente respecto a fase

V_f : Voltaje respecto a línea a neutro

Al momento de despreciando R_a se igualan lo componentes vectoriales restantes.

Al momento de despreciando R_a se igualan lo componentes vectoriales restantes.

$$I * \cos\varphi = \frac{E \sin\delta}{X_s} \quad (3.5)$$

Al momento de remplazar la ecuación (3.4) y despreciando la resistencia del inducido R_a se presenta que $X_s \gg R_a$ obtenido la potencia activa generada:

$$P = \frac{3*V*E*\sin\delta}{X_s} \quad (3.6)$$

Con estas expresiones se puede evidenciar que la potencia activa depende en si del ángulo delta, cuando este ángulo este en 90° la potencia llega a su máximo más conocido como la estabilidad en estado estable [12].

3.5. Operación en los cuatro cuadrantes

La máquina sincrónica puede operar en los cuatro cuadrantes de P-Q de acuerdo a la Figura cuando la potencia activa es positiva se entrega potencia activa a la red, y se puede visualizar que está en los cuadrantes I y IV, cuando la máquina opera como generador la potencia reactiva suministra reactivos a la red lo cual pertenece a los cuadrantes I y II [13].

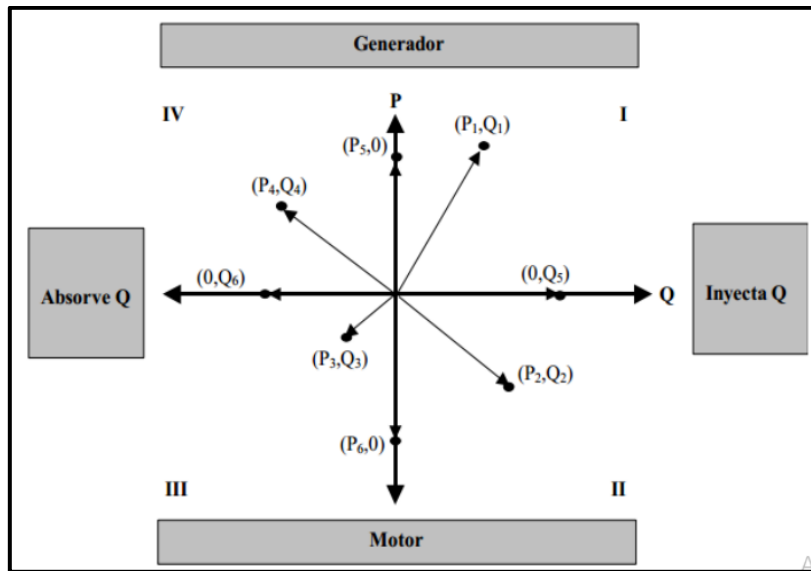


Figura 3.4. Cuadrantes de operación de una máquina síncrona [13].

Mediante la Tabla 3.1., se puede presenciar las condiciones de operación:

Tabla 3.1 Condiciones de operación de las máquinas síncronas [13].

Punto	Operación
(P1, Q1)	Generador sobrecitado o generador inductivo ($P1 > 0, Q1 > 0$)
(P2, Q2)	Motor sobrecitado o motor capacitivo ($P2 < 0, Q2 > 0$)
(P3, Q3)	Motor sub-excitado o motor inductivo ($P3 < 0, Q3 < 0$)
(P4, Q4)	Generador sub-excitado o generador capacitivo ($P4 > 0, Q4 < 0$)
(0, Q5)	Condensador síncrono ($P = 0, Q5 > 0$)
(0, Q6)	Reactor síncrono ($P = 0, Q6 < 0$)
(P5, 0)	Generador operando con factor de potencia unitario ($P5 > 0, Q = 0$)
(P6, 0)	Motor operando con factor de potencia unitario ($P6 < 0, Q = 0$)

3.6. Tipos de generadores

Existen dos tipos de generadores de corriente alterna los generadores asíncronos o de inducción y los generados síncronos o alternadores.

3.6.1.1. Generadores asíncronos o de inducción

Un generador de inducción, también conocido como generador asíncrono, es un dispositivo que convierte la potencia mecánica de un motor primario en potencia eléctrica CA de voltajes y de la frecuencia específica, el rotor de este generador se ubica dentro de un campo magnético giratorio y una fuente de energía mecánica externa hace girar el rotor para que gire más rápido que el campo magnético [14].

Este eje giratorio comienza a empujar el campo magnético hacia adelante, suministrando energía a las bobinas del generador, en comparación con otras formas de generadores, los generadores de inducción son más simples, más robustos y pueden continuar generando electricidad de manera eficiente cuando cambia la velocidad del rotor, por lo tanto el generador de inducción necesita una fuente de energía externa para generar un campo magnético giratorio y comenzar a funcionar, pero una vez que comienza a generar electricidad, puede seguir funcionando por sí solo siempre y cuando haya una fuente de energía mecánica, incluso estos generadores de inducción son utilizados como fuentes de energía para molinos o sistemas de recuperación de energía, estas máquinas son utilizadas mayormente como motores [15].



Figura 3.5. Estator y carcasa de la máquina asíncrona o de inducción [10].

3.6.1.2. Generador síncrono

Un generador síncrono es una máquina eléctrica, capaz de convertir energía mecánica (en forma de rotación) en electricidad, su funcionamiento consiste en la excitación de flujo en el rotor, los generadores síncronos se componen principalmente de un rotor y estator por tanto el rotor gira para recibir un par externo, de tal manera, este rotor tiene una fuente de excitación "DC" acoplada el

cual produce un flujo constante de argumentos, pero acoplado al rotor, genera un campo magnético giratorio (por el teorema de Ferraris) que produce un sistema trifásico de fuerza electromotriz en los devanados del estator [16].

En los generadores síncronos auto excitantes no es necesario utilizar escobillas en cambio en los de excitación utilizan escobillas y anillos rodantes.

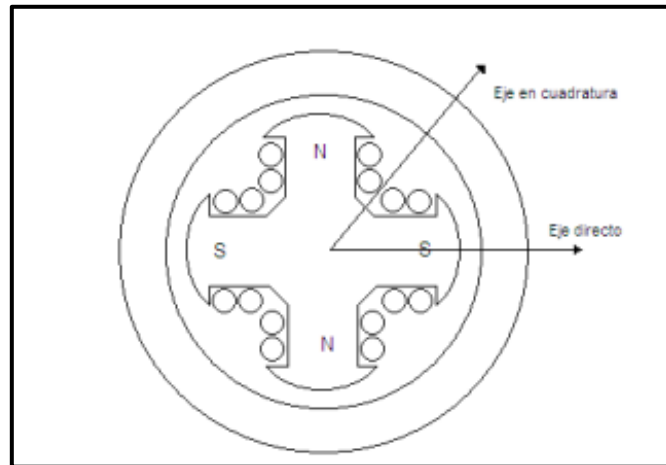


Figura 3.6. Generador síncrono de polos salientes [8].

Cuando el generador síncrono genera, la frecuencia depende de la velocidad de la máquina motriz, mientras que la corriente y el factor de potencia dependen de la carga, de la impedancia del generador y de la excitación del campo

3.6.2. Circuito equivalente del generador síncrono

En este circuito de la figura nos permite identificar las variables que actúan en el generador así como los parámetros que constituyen esta máquina, la estructura de campo (f) es representado mediante su efecto, es decir la tensión generada (E_f) y la armadura mediante la corriente de armadura (\bar{I}_a), la tensión en los bornes (\bar{V}_a), así mismo estarán representados la Reactancia síncrona (X_S) y la Resistencia del devanado de armadura (R_a), luego de ser identificados estos elementos se formularán las ecuaciones de equilibrio que interrelacionen las variables y los parámetros, las que servirán de insumo para la gráfica de las curvas operativas [17].

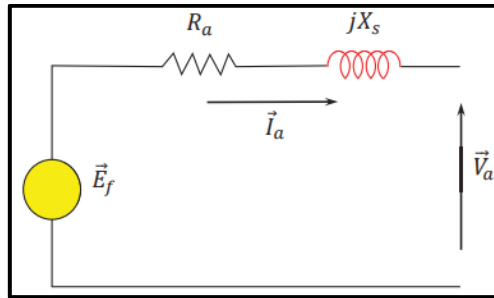


Figura 3.7. Circuito equivalente del generador síncrono [17].

Del circuito equivalente se tiene que señalar que la Reactancia síncrona resulta de la suma de dos reactancias:

- La reactancia de reacción de armadura (X_{ra})
- La reactancia de dispersión (X_d), las mismas que son inherentes a las máquinas eléctricas rotativas.

La reacción de armadura se presenta cuando circula la corriente de armadura (\bar{I}_a), creando un campo magnético denominado “reacción de armadura” y que interactúa con el flujo magnético de campo presentándose los fenómenos de distorsión y disminución del flujo principal o de campo [17].

$$X_S = X_{ra} + X_d \quad (3.7)$$

Donde:

X_S : Reactancia síncrona.

X_{ra} : Reactancia de armadura.

X_d : Reactancia de dispersión

Por lo tanto, la reactancia síncrona es dependiente de la reactancia de armadura al igual que los flujos de dispersión del rotor como del estator, tomando en cuenta el circuito equivalente se presenta la siguiente ecuación [17].

$$E = \bar{V}_a + (R_a + jX_S) \bar{I}_a \quad (3.8)$$

$$Z_a = (R_a + jX_S) \quad (3.9)$$

Donde:

E : Tensión de interna del generador

\bar{I}_a : Corriente de carga o armadura.

\bar{V}_a : Tensión de carga o armadura.

R_a : Resistencia de armadura.

X_s : Reactancia síncrona.

3.6.3. Partes del generador síncronico

En este punto se dará a conocer los componentes básicos que está compuesto el generador síncrono:

- Rotor, campo o excitación del generador.
- Estator o armadura.
- Regulador automático de voltaje (AVR).
- Regulador de velocidad.

3.6.3.1. Rotor o excitación del generador síncronico.

Es la parte rotatoria del generador, ya que este tiene como función formar un campo magnético en el interior del generador con una tensión continua que recorre por el devanando de campo puesto que el giro de rotación de la turbina es porque esta acoplada al eje principal del campo magnético inducido por los devanados del estator, al ser una parte que constituye el generador esta ópera a velocidades considerables ya que está diseñado para los esfuerzos mecánicos durante el arranque y parada del generador cabe recalcar que obtiene una resistencia mecánica que soporta los devanados del rotor y pueda operar con una carga mecánica y térmica [18].

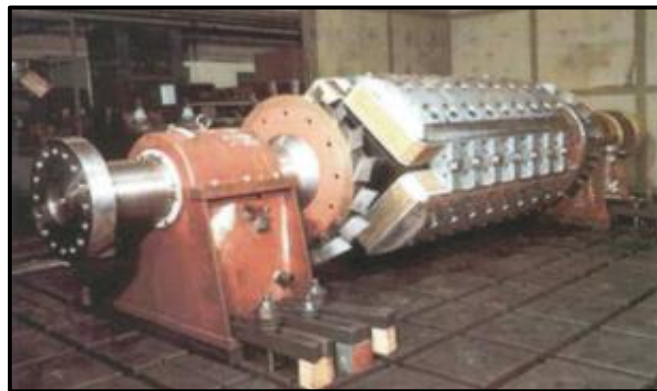


Figura 3.8. Rotor del generador síncrono [7].

3.6.3.2. Estator o armadura

Es una parte fija del generador ya que esta cubre al rotor en su interior y a la vez hacer girar al rotor, sin embargo, tienen unas ranuras en las que albergan los conductores inducidos los cuales forman el bobinado del estator básicamente está constituido por material ferromagnético y por las siguientes partes [19].

- Carcasa
- Núcleo magnético
- Devanados
- Elementos mecánicos y eléctricos.

La carcasa es una distribución metálica que procura sostener y cuadrar el núcleo magnético del estator, cabe recalcar que para centrales hidroeléctricas su acoplamiento es en forma vertical mientras que en centrales termoeléctricas es horizontal [20].

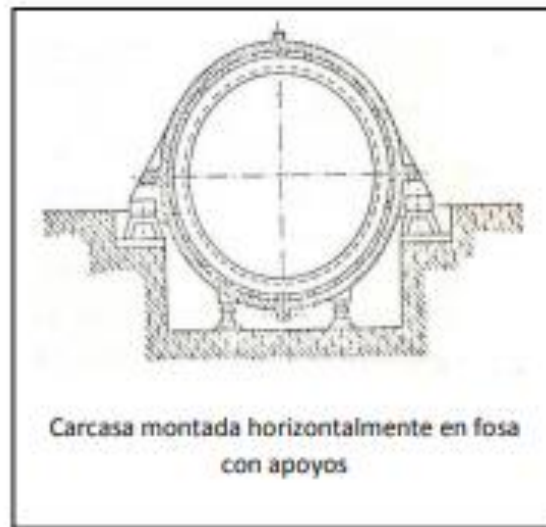


Figura 3.9. Carcasa del estator [20].

3.6.3.3. Regulador automático de voltaje (AVR)

El del AVR (Regulador Automático de Voltaje) es parte del controlador sistema de excitación, que es detectado por los terminales (y la corriente del estator en algunos casos) al iniciar la operación correctiva en el campo, de modo que la tensión de los terminal y la potencia reactiva cambien según sea necesario de manera automática, puesto que cuando se detecta cambios en la carga del

generador el regulador de voltaje actúa, de tal manera que al momento de elevar la corriente del estator la tensión o voltaje tiende a disminuir los valores y al momento de desconectar la carga la corriente o intensidad disminuye y el voltaje comienza a aumentar, es por eso que los AVR necesitan de una retroalimentación de la tensión y de la corriente del generador síncrono para poder suministrar a la tensión ante cualquier alteración de la carga [21].

3.6.3.4. Regulador de velocidad

El regulador de velocidad tiene por objetivo regular la velocidad máxima y mínima del sistema de una máquina síncrona por ende controla la velocidad y la frecuencia, de tal manera que puede llegar a alcanzar cuando esta máquina decrece el par resistente o cuando opera en vacío [22].

3.7. Sistema de excitación de los generadores síncronos.

En la salida de voltaje de media tensión de los generadores síncronos necesitan un sistema de excitación en el campo para poder conseguir el voltaje de salida, esto se debe a que el sistema de excitación es fundamental para el generador debido a que permite mantener estable la salida del voltaje [20]. Además, permite obtener una reacción rápida ante las perturbaciones repentinas de la carga con el fin de mantener estable el sistema, los sistemas de excitación se catalogan según la fuente que se va a utilizar las cuales son:

- Corriente continua (DC)
- Corriente Alterna (AC)
- Estática

Para poder determinar el sistema de excitación para el generador síncrono [11]. Se debe tomar en cuenta que relación se tiene en la tensión que esta inducida en los devanados de armadura E_a , por fase y en valores rms, para la corriente de excitación se expresa una ecuación la cual viene dada por:

$$E_a = 4.44 * k * f * N * \varphi_{max} \quad (3.10)$$

Donde:

E_a : Tensión interna de generación

k : Bobinados de armadura

f : frecuencia Hz

N : Numero de espiras

φ_{max} : Flujo

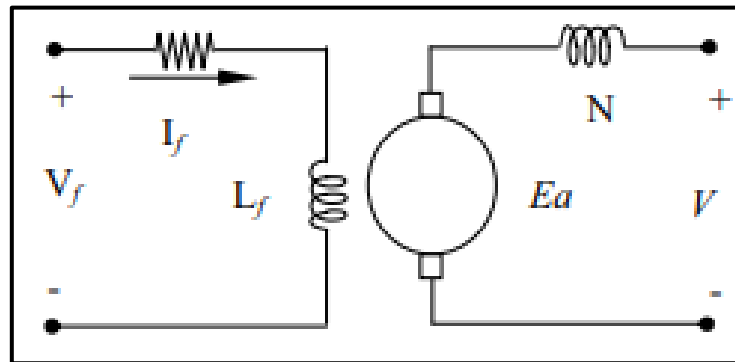


Figura 3.10. Circuito del sistema de excitación [11].

Como se muestra en la Figura 3.10., daremos un análisis en donde (K) depende de los tipos de devanado de armadura, en cambio (f) suele ser la frecuencia de todo el sistema y (N) contiene el número total de espiras en la armadura, por lo tanto, el flujo (φ_{max}) es derivado por la corriente del bobinado de campo (I_f) [11].

3.8. Pérdidas en los generadores síncronos.

La máquina síncrona no logra generar energía eléctrica por sí sola, por ende, se necesita de una fuente de potencia mecánica, en este caso puede ser de un motor primario o una turbina ya que estos permiten mantener la velocidad constante [20]. Desgraciadamente la mayoría de potencia mecánica que obtiene el generador no puede ser transformada a energía eléctrica, ya que en este lapso de operación existen pérdidas de potencia, en los distintos parámetros de carga la potencia total obtiene pérdidas las cuales son:

- Pérdidas en el inducido
- Pérdidas en el núcleo
- Pérdidas mecánicas
- Pérdidas por excitación
- Pérdidas en los accesorios

El efecto joule se presente debido a las pérdidas que se tiene en el inducido y a la vez puede afectar al estator, a continuación, se presenta una ecuación en donde se utiliza la resistencia del devanado del estator.

$$P_i = 3R_a I_a^2 \quad (3.11)$$

Donde:

P_i : Potencia disipada en calor (W)

R_a : Resistencia por fase del devanado del estator.

I_a : Corriente por fase

3.9. Generador de polos lisos y polos salientes

3.9.1. Generador de polos lisos (rotor cilíndrico)

Estas máquinas síncronas de rotor cilíndrico poseen 2 o 4 polos y son de alta velocidad, por otra parte, los alternadores son utilizados para acoplarse a la turbina térmica (turboalternadores), y los conductores del rotor están sujetos a grandes fuerzas durante la rotación rápida Centrifuga, por lo tanto, los cables del rotor se colocan en las ranuras (se sostienen mejor que las bobinas de polos salientes) y Rotor de pequeño diámetro (reduce la fuerza centrífuga), por tanto, son máquinas con diámetros pequeños y grandes longitudes axiales [23].

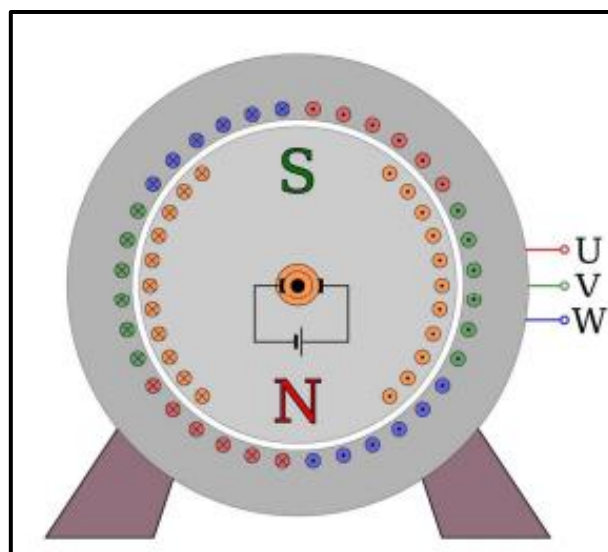


Figura 3.11. Generador de polos lisos (rotor cilíndrico) [23].

En la ecuación indica la potencia de generación del generador síncrono de polos lisos:

$$S = V * I_a^* \quad (3.12)$$

Donde:

S : Potencia aparente (nominal)

V : Voltajes o tensión de terminales del generador

I_a^* : Corriente conjugada (estator)

$$\bar{V}_\phi = \bar{E}_A - jX_s\bar{I}_A - R_A\bar{I}_A \quad (3.13)$$

Donde:

\bar{V}_ϕ : Fasor de voltaje de fase y magnitud

\bar{E}_A : Fasor tensión inducida y magnitud

X_s : Reactancia síncrona

\bar{I}_A : Fasor corriente de armadura

R_A : Resistencia del estator

En el voltaje de fase para el generador de polos lisos se desprecia la resistencia de armadura R_A debido a que $X_s \gg R_A$ dando como resultado la siguiente expresión:

$$\bar{V}_\phi = \bar{E}_A - jX_s\bar{I}_A \quad (3.14)$$

En la Figura 3.12., se indica el diagrama fasorial del generador síncrono de polos lisos [24].

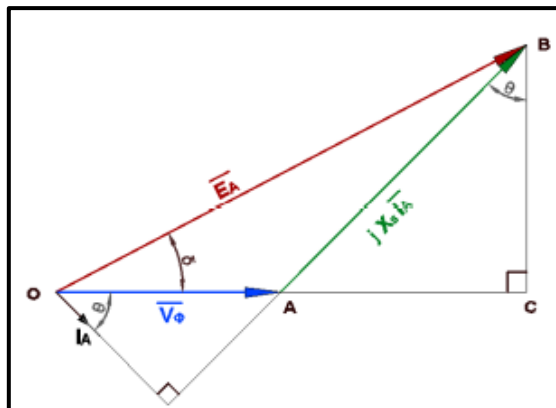


Figura 3.12. Diagrama fasorial del generador síncrono de rotor cilíndrico [24].

Se debe tener presente la potencia que entrega el generador síncrono por fase, se expresa de la siguiente manera:

$$P = \frac{V \cdot E}{X_d} \text{ sen } (\delta) \quad (3.15)$$

Donde

P : Potencia activa (por fase)

E : Voltaje interno del generador síncrono

δ : Ángulo interno de los voltajes

X_d : Reactancia del eje directo

$$Q = \frac{V \cdot E}{X_d} \text{ cos } (\delta) - \frac{V^2}{X_d} \quad (3.16)$$

Donde:

Q : Potencia reactiva (por fase)

E : Voltaje interno del generador síncrono

V : Voltajes de terminales del generador

δ : Ángulo interno de los voltajes

X_d : Reactancia del eje directo

3.9.2. Generador síncrono de polos salientes

Estos generadores con rotor de polos salientes principalmente trabajan a bajas velocidades esto se debe a que trabaja con mayor número de polos que es lo contrario a rotor de polos lisos, mayormente este tipo de generadores con rotor de polos salientes se utilizan en centrales hidráulicas ya que trabajan a velocidades que van desde 200 rpm hasta los 1800 rpm, la ventaja es que los devanados del rotor se encuentran distribuidos y dispuestos mecánicamente para poder brindar soporte a los pertinentes devanados [14].

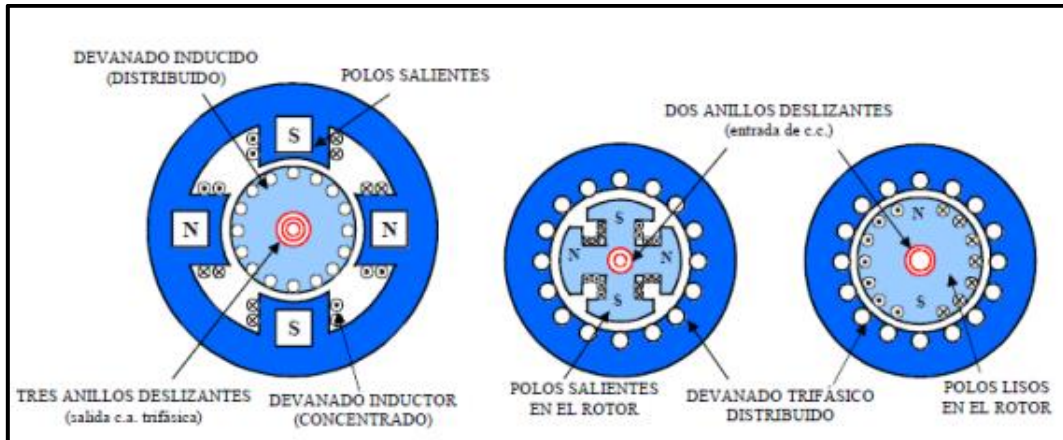


Figura 3.13. Aspectos constructivos rotor [25].

A continuación, se presenta el diagrama fasorial del generador síncrono de polos salientes:

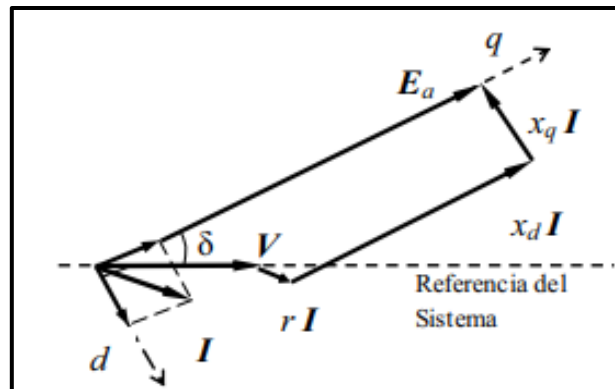


Figura 3.14. Diagrama fasorial del generador síncrono [11].

La ecuación se basa en el voltaje de fase para un generador síncrono de polos salientes ya que R_A es insignificante comparado con las reactancias y su modelo matemáticos se expresa de la siguiente manera:

$$\bar{V}_\phi = \bar{E}_A - jX_d \bar{I}_d - jX_q \bar{I}_q \quad (3.17)$$

Donde:

\bar{V}_ϕ : Fasor de voltaje de fase y magnitud.

\bar{E}_A : Fasor tensión inducida y magnitud.

X_d : Reactancia del eje directo.

\bar{I}_d : Magnitud de la corriente de armadura en el eje d.

X_q : Reactancia de cuadratura.

Las potencias que entrega el generador síncrono de polos salientes por fase se obtienen mediante las siguientes expresiones.

$$\bar{S} = \bar{V} - (\bar{I}_q + \bar{I}_d) \quad (3.18)$$

Donde:

\bar{S} : Potencia aparente (nominal).

\bar{I}_q : Corriente del eje de cuadratura.

\bar{I}_d : Corriente del eje directo

La potencia activa por fase viene expresada por:

$$P = \frac{EV}{X_d} \text{sen}\delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen}2\delta \quad (3.19)$$

Donde:

P : Potencia activa por la fase.

E : Voltaje interno del generador.

V : Voltaje en los terminales del generador.

δ : Ángulo interno.

X_d : Reactancia del eje directo.

X_q : Reactancia del eje de cuadratura.

La potencia reactiva por fase viene expresada por:

$$Q = \frac{EV}{X_d} \text{cos}\delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{cos}2\delta - \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) \quad (3.20)$$

Donde:

Q : Potencia reactiva por la fase.

E : Voltaje interno del generador.

V : Voltaje en los terminales del generador.

δ : Ángulo interno.

X_d : Reactancia del eje directo.

X_q : Reactancia del eje de cuadratura.

3.10. Límites de operación del generador sincrónico

3.10.1. Corriente de armadura máxima

Es la corriente que se produce por el calentamiento del estator la cual determina la vida útil de la máquina, en el plano de potencias se produce una semicircunferencia igual a la potencia aparente máxima en (kVA) el cual viene dado por el producto de la corriente máxima de armadura y la tensión nominal del generador [26].

$$S_{max}^2 = P_{arm}^2 + Q_{arm}^2 = VI_{a max} \quad (3.21)$$

Donde:

S_{arm} : Potencia aparente máxima de armadura.

P_{arm} : Potencia activa de armadura

Q_{arm} : Potencia reactiva de armadura

$I_{a max}$: Corriente máxima de armadura

$$-VI_{a max} \leq Q_{arm} \leq VI_{a max} \quad (3.22)$$

Este límite de la corriente de armadura se obtiene con el objetivo de no causar deterioro en los devanados, se determina con el valor de potencia aparente máxima.

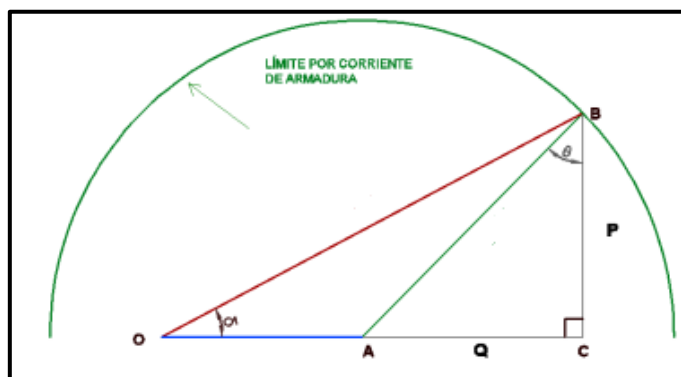


Figura 3.15. Corriente máxima de armadura [26].

La obtención del límite requiere del análisis a partir de la Figura 3.15., del cual se infiere las ecuaciones para la potencia activa y reactiva por fase.

3.10.2. Corriente de campo máxima

Este límite tiene como objetivo no causar daño en los devanados por aumento de temperatura, siendo denominado límite térmico [27].

Este límite también se lo puede representar en forma polar para representar el lugar geométrico de la potencia aparente para valores constantes de corriente de campo, esta curva se denomina Limacon de Pascal, esta gráfica es la conoide de una circunferencia que pasa por el polo, obteniéndose una familia de curvas en función a la relación entre los radios de las circunferencias que la definen, como se muestra en la **Figura 3.16** con valores variables de m , n y s [27].

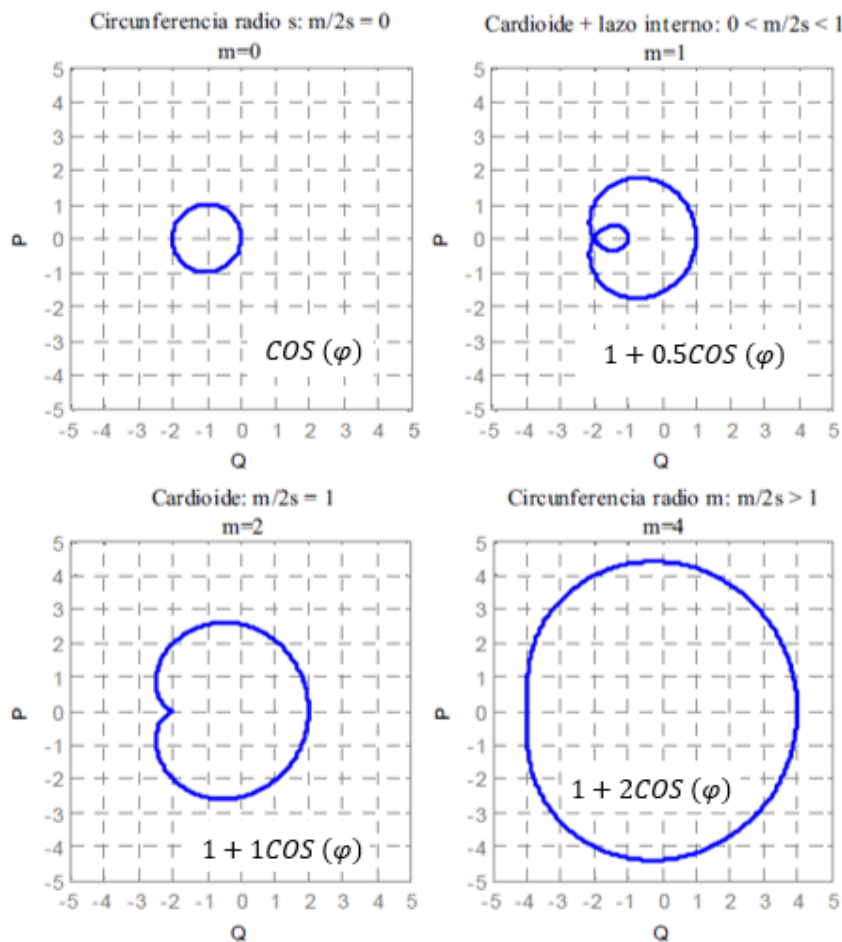


Figura 3.16. Límite de excitación máxima del generador síncrono [27].

El límite de corriente de campo como se indicó anteriormente es el límite térmico de su respectivo bobinado o devanado, siendo este valor influyente en el voltaje máximo en bornes de igual forma.

$$m = f \frac{E_A V_\phi}{X_d} \quad (3.23)$$

$$s = f \frac{V_\phi^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \quad (3.24)$$

$$n = f \frac{V_\phi^2}{2} \frac{X_d + X_q}{X_d X_q} \quad (3.25)$$

Donde:

(m, s, n) : Variables constantes del generador.

f : Cantidad de fases.

V_ϕ : Voltaje de fase.

3.10.3. Potencia máxima

Este valor es el limitante en la parte superior de la curva de capacidad, es una constante y es determinada por la máquina [27].

$$P_{max} = m * \text{sen}\delta + s * \text{sen}2\delta \quad (3.26)$$

3.10.4. Estabilidad en régimen permanente

Este límite determina el valor máximo de potencia activa sin perder la estabilidad, cuando el generador está suministrando energía [27].

$$R_{Les} = 2s \tan \delta \cos \delta \quad (3.27)$$

Donde:

R_{LES} : Radio de la curva de la estabilidad Teórica.

La ecuación (3.28) y (3,29), indica los parámetros de una cisoide de diocles la cual es conocida como el límite de estabilidad teórica

$$P_{les} = R_{Les} * \text{sen}\delta \quad (3.28)$$

$$Q_{les} = R_{Les} * \text{cos}\delta - (n - s) \quad (3.29)$$

Donde:

P_{les} : Potencia activa de la estabilidad teórica.

R_{les} : Radio de la curva de la estabilidad teórica

Q_{les} : Potencia reactiva de la estabilidad teórica.

3.10.5. Pruebas eléctricas del generador síncrono

Para examinar el rendimiento de las máquinas síncronas en los SEP, es conveniente realizar un circuito equivalente que determine la conducta de la misma y obtener las variables correspondientes para realizar las pruebas de la máquina síncrona [28].

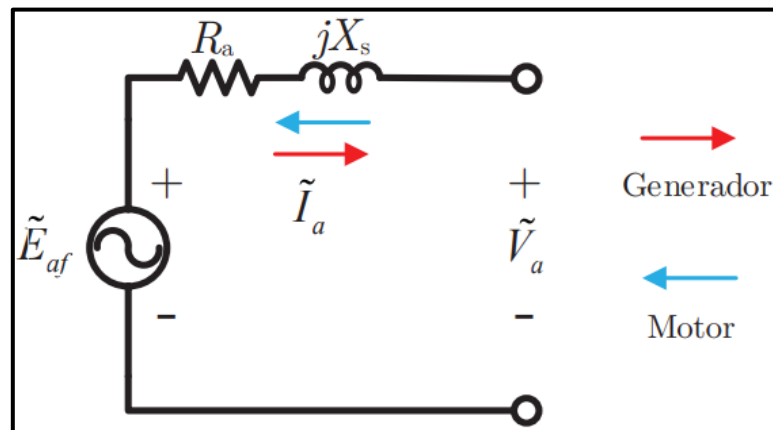


Figura 3.17. Circuito equivalente por fase de un generador síncrono [28]

Donde:

E_{af} : Generador interna.

R_a : Resistencia interna.

X_s : Reactancia síncrona.

I_a : Corriente de generador.

V_a : Voltaje de bornes.

Para realizar la curva de capacidad del generador, se deben obtener los parámetros de la máquina síncrona mencionados anteriormente y para ello se debe llevar a cabo tres pruebas fundamentales para el funcionamiento de la misma:

- Prueba de circuito abierto
- Prueba de cortocircuito
- Prueba de resistencia

3.10.5.1. Prueba de circuito abierto

Esta prueba consiste en poner al generador en vacío, es decir, sin ninguna carga a sus salidas, esta se deberá hacer girar a su velocidad síncrona y con una corriente igual a cero debido a que no tiene carga alguna. Aumentando secuencialmente la corriente de campo, se irán obteniendo valores de tensión interna de la máquina E_{fa} , debido a que la corriente de campo es cero I_a , la tensión en bornes del generador será igual a la tensión interna del mismo $E_{af} = V_a$, debido a los valores obtenidos se puede dibujar la “Curva característica de vacío” E_{af} vs I_f la cual consciente obtener una tensión interna producida por una corriente de campo determinada [29].

El procedimiento para realizar la prueba de circuito abierto es la siguiente:

- Abrir el circuito en terminales del generador, es decir, que no esté conectada a alguna carga.
- Tener la máquina a una velocidad síncrona a través de un sistema mecánico externo.
- Aumentar de manera progresiva la corriente de campo y medir la tensión en los bornes del generador.

Al no existir corriente en la armadura, la tensión en bornes del generador será igual a la tensión inducida.

$$E_{af} = V_a \quad (3.24)$$

Si el generador se encuentra conectado en estrella, la tensión medida será de línea-línea V_{ac} , cuya tensión inducida será igual a:

$$V_{ac} = \sqrt{3}E_{af} \quad (3.25)$$

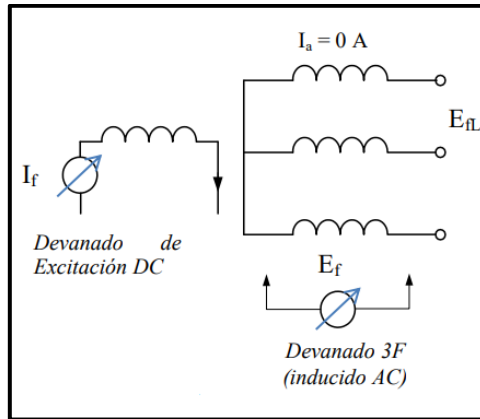


Figura 3.18. Diagrama de prueba de circuito abierto de generador síncrono

La corriente de campo puede subir hasta que el voltaje en el circuito abierto doble el valor designado. De los registros para la tensión de circuito abierto, se puede calcular la tensión de cada fase. Al graficar el voltaje por fase en función de la corriente campo, se llama curva característica (curva de saturación de circuito abierto (CCA)).

Siempre que el circuito magnético del generador síncrono no esté saturación. Dado que en la región lineal la brecha consume la mayor parte del FMM, la recta se denomina como: línea del entrehierro. A medida que aumenta la saturación, la CCA comienza a tomar otra dirección de la línea del entrehierro [29].

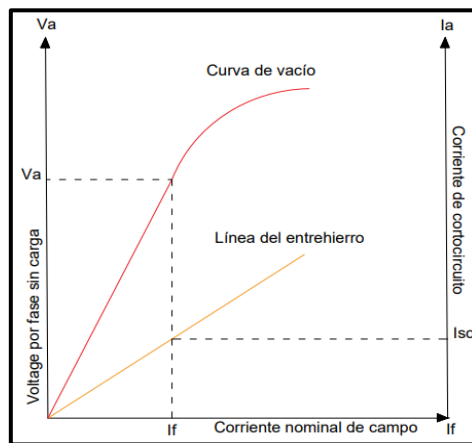


Figura 3.19. Curvas características en vacío del generador síncrono [29]

3.10.5.2. Características de la prueba de circuito abierto

El dato inicial que se debe tomar para la prueba de circuito abierto es el de la corriente de campo $I_f = 0$, correspondiente de la tensión residual. Seguidamente dicha corriente de incrementa

progresivamente con el reóstato R tomando así corrientes de campo y a su vez tensión de armadura V_a , todo esto hasta llegar a un máximo de 120% de su tensión nominal. Con estos datos obtenidos se procede a construir la curva característica de saturación en vacío, en la Figura 3.19., se puede observar que a medida que se va aumentando la corriente de campo I_f , esta tiende en un punto a acercarse a la zona de saturación [29].

3.10.5.3. Pruebas de cortocircuito

Para la realización de esta prueba consiste en que los terminales de la máquina síncrona estén cortocircuitados, es decir, que la corriente de campo sea igual a cero, para después de esto subir gradualmente la corriente de campo. El procedimiento de este ensayo se lo detalla a continuación: [29].

- La corriente de campo debe ser igual cero.
- Cortocircuitar los terminales de la armadura.
- La velocidad nominal del generador se acciona con una máquina externa.
- Incrementar de manera progresiva la corriente de campo hasta que la corriente de cortocircuito de la armadura alcance su nivel máximo.

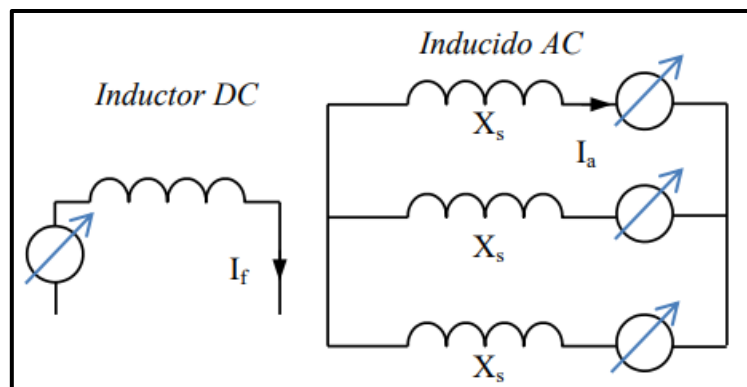


Figura 3.20. Diagrama de prueba en cortocircuito.

Esta prueba se la realiza conectando un amperímetro en serie con una de las líneas, estas deben estar cortocircuitadas. Al incrementar progresivamente la corriente de campo se van obteniendo los valores correspondientes a corrientes máximas de la armadura cortocircuitada, estos valores no deben exceder en un 200% al valor de la corriente especificada de la máquina síncrona. Con estos

registros se calcula la corriente por fase, también, con estos datos se obtiene la curva característica de cortocircuito (CCC) de la máquina síncrona [29].

Dentro de la práctica los valores de las pruebas de CCA y CCC se deben realizar en una misma gráfica debido que la tensión en terminales del generador cortocircuitado es igual a cero, mientras que la tensión por fase del generador debe ser similar a la caída de tensión a través de la impedancia síncrona [29].

3.10.5.4. Características de la prueba de cortocircuito

El generador girando a su velocidad nominal y los terminales cortocircuitados, se tiene que ir variando la resistencia de campo R se toman los valores de manera progresiva las corrientes de armadura I_a y de campo I_f , estas se toman por lo general en 25%, 50%, 75%, 100% y 125% de la corriente nominal de armadura I_a [29].

4. METODOLOGÍA

4.1. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Los procedimientos aplicados dentro del plan a fin de obtener resultados y conclusiones útiles en la indagación fueron escogidos de tal forma que posibilite obtener información de forma instantánea y concisa por medio de la aplicación idónea de dichos procedimientos, la información recolectada dejará tener una idea clara para el analizar de la curva de capacidad de generadores síncronos.

4.1.1. Método deductivo

Este método consiste en entender a partir de la carta de operación de la máquina síncrona, deduciendo si está funcionando en condiciones óptimas o no dentro del problema existente.

4.1.2. Método experimental

En base a este método se puede tomar datos del generador ya sea en condición normal o en el momento que se inyecte un voltaje CD para la excitación de sus bobinas y de esta manera tener una gráfica del comportamiento de la máquina síncrona.

4.1.3. Método científico

En este punto, los proyectos de investigación se los puede solucionar habiendo obtenido una amplia información referente al tema propuesto, es decir, reunir abundante bibliografía resulta conveniente para la elaboración de la curva de capacidad.

4.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

Con el propósito de entender el funcionamiento de generadores y motores, este proyecto tiene la finalidad de investigar y dar soluciones a las máquinas síncronas cuando estas estén fuera de los límites de operación mediante la denominada “carta de operación de generadores síncronos”, para así tener un sistema óptimo y confiable.

La investigación realizada presenta un enfoque mixto, ya que se basa en primer lugar en un método cualitativo debido a que se va a Fundamentar de forma teórica y científica sobre la curva de capacidad y la operación de una Unidad Motor Generador, por otra parte, posee un enfoque cuantitativo ya que se realizará una simulación para Delimitar la curva de capacidad para la operación de una unidad motor generador AC-AC conectado a la barra y aislado, a partir de una simulación.

4.3. TIPOS DE INVESTIGACIÓN

4.3.1. Investigación de campo

Esta investigación se basa en recolectar la información necesaria y adecuada para dar solución a los problemas que existen en el proyecto de investigación, en este caso los límites de operación que tiene un generador para operar en régimen estable.

4.3.2. Investigación bibliográfica

Este tipo de investigación fue necesaria con la finalidad de investigar, recopilar, organizar, evaluar y analizar la información relevante acerca del proyecto y así tener un conocimiento más claro en lo que comprende la estabilidad de generadores. Mediante la cual se encontró la denominada carta de operación de una máquina síncrona que especifica los límites de seguridad que tiene la máquina para su funcionamiento en el plano cartesiano

4.3.3. Investigación descriptiva

Tiene la finalidad de describir los parámetros de potencia activa y reactiva del generador síncrono para permanecer en un estado de operación óptimo y no exceda los límites establecidos por la carta de operación de la máquina síncrona para no traer consecuencias que perjudiquen su funcionamiento.

4.4. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS

A través del diagrama de flujo de la Figura 4.1., se indica proceso que cumplirá la aplicación en el software Matlab, el cuál inicia con la importación de los valores de frecuencia, voltaje, corriente de campo y armadura, correspondientes a las pruebas de cortocircuito y vacío de la unidad motor generador, mediante el cálculo matemático y las herramientas de gráficas del software se obtiene la curva de capacidad, con el rango de los parámetros de voltaje y corriente de alimentación para operar en régimen estable.

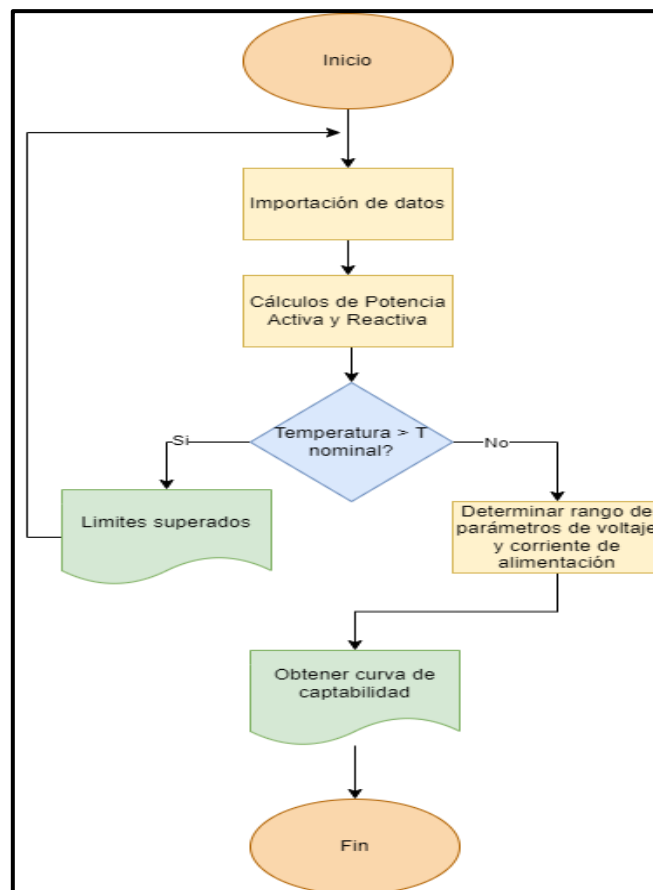


Figura 4.1. Diagrama de flujo de la aplicación en Matlab.

4.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.

Tabla 4.1. Características de la curva de capacidad

Concepto	Características de la variable	Unidades	Fórmulas
Curva de capacidad	Voltaje	V	$\bar{V}_f = \bar{E}_A - jX_d\bar{I}_d - jX_q\bar{I}_q$
	Corriente	A	$I_f = \frac{P}{3 * V_f * I_f * \text{Cos}\varphi}$
	Potencia	W, VAR	$P = 3 * V_f * I_f * \text{Cos}\varphi$ $Q = \sqrt{3} * V * I * \text{sin}\varphi$
	Pérdidas	W	$P_T = P_{fe} + P_{fw}$

Para el análisis de los valores obtenidos en las pruebas de cortocircuito y al vacío se considera la unidad motor generador con las características mostradas en la **Tabla 4.2**.

Tabla 4.2. Características de la unidad motor generador

	Generador trifásico	Motor de Inducción	Fuente de alimentación
Potencia (W)	5000	3677,49	60

La información de la unidad indica el tipo de arranque y valores nominales de operación. Como la fecha de adquisición por parte de la Universidad y el tiempo de funcionamiento.

Estos valores son medidos con la pinza amperimétrica Fluke 376 FC que cuenta con las especificaciones indicadas en la Tabla 4.3 y su aspecto físico en la Figura 4.2.



Figura 4.2. Partes de una pinza amperimétrica [26]

La pinza cuenta con una mordaza de detección, barreras táctiles, botón de retención, selector, pantalla, botón de retroiluminación, botón de mínimo y máximo, botón de corriente de entrada, botón de acero, palanca de liberación de mordaza, marcas de alineación, bornera de entrada común, bornera de entrada [26]. Sonda de corriente flexible respectivamente con los números indicados en la **Figura 4.2**.

Tabla 4.3. Características del multímetro [26]

Fluke 376 FC	
Rango de corriente	999,9 A
Resolución	0,1 A
Exactitud	2 % ± 5 dígitos (10-100 Hz)
	2,5 % ± 5 dígitos (100-500 Hz)
Factor de cresta (50/60)	3 a 500 A (solo 375 y 376)
	2,5 a 600 A
	1,42 a 1 000 A (solo 376)
	Agregar un 2 % para C.F. > 2
Corriente CA por medio de sonda flexible de corriente	
Rango	2,500 A
Resolución	0,1 A (≤ 999,9 A)
Exactitud	1 A (≤ 2500 A)
	3 % ± 5 dígitos (5 - 500 Hz)
Factor de cresta (50/60)	3,0 a 1.100 A (Solo 375 y 376)
	2,5 a 1.400 A
	1,42 a 2.500 A
	Agregar un 2 % para C.F. > 2

También se utiliza el multímetro digital Fluke 115 el cual se muestra en la Tabla 4.3., y sus características principales en la Tabla 4.4 [26].



Figura 4.3. Multímetro digital Fluke 115 [26]

Tabla 4.4. Características del multímetro [26]

Variable	Valor
Voltaje (V)	600
Corriente (A)	10
Clasificación	CAT III

La categoría III indica que soporta niveles de voltaje hasta los 600 voltios en corriente alterna y corriente continua, así como la capacidad de corriente, soportando un valor de sobrecarga de 20 A durante 30 segundos como máximo.

4.5.1. Normativa

Los parámetros del generador síncrono obtenidos, permiten el cálculo del rendimiento del generador mediante la potencia activa y reactiva obtenida por los valores de las pruebas realizadas. Donde hacen referencia a las siguientes normas americanas.

4.5.1.1. IEEE-1110-2002

La norma IEEE 1110-2002 indica las prácticas de modelado de generadores síncronos y aplicaciones en análisis de estabilidad de sistemas de potencia haciendo referencia a tres tipos de eje recto y cuatro tipos de eje en cuadratura, junto con el modelo de reactancia transitoria básica, también discute algunos supuestos, usar varios modelos e introducir las ecuaciones y conceptos básicos involucrados, la interconexión generadora/sistema, en general, también cubre varios Propiedades de estabilidad de los sistemas de potencia, identificando dos métodos básicos IEEE 1110-2002 [30]

4.5.2. Desarrollo de la aplicación

Matlab es un software diseñado para trabajar con diferentes cálculos numéricos ya que posee un lenguaje técnico [31]. Una fácil programación y visualización este programa ofrece los beneficios de:

- Fórmulas matemáticas
- Algoritmos
- Gráficas
- Modelación [31].
- Simulación
- Exploración
- Visualización
- Interfaz
- Adquisición de datos [31].

El software utilizado en este proyecto es Matlab quien contiene múltiples librerías, una de ellas es Guide con la que se contara para el ingreso y ejecución de datos continuos que serán requeridos para la obtención gráfica de la curva de capacidad. La versión utilizada para esta investigación es la R2018a [31].

Para el desarrollo de la aplicación se importa los valores indicados anteriormente, para determinar los límites para el suministro de potencia reactiva a una salida de potencia activa determinada mediante la curva de capacidad del generador. Las siguientes restricciones operativas son las razones de los límites de potencia activa y reactiva [31].

- A. Límite de corriente de armadura
- B. Límite de corriente de campo
- C. Límite de estabilidad en estado transitorio
- D. Límite de calentamiento del estator
- E. Límite de potencia mecánica

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para el desarrollo de la curva de capacidad se debe tener en cuenta los datos de placa del generador proporcionados por los fabricantes.

Tabla 5.1. Datos de placa del generador

DESCRIPCIÓN	VALOR
Grado de protección	IP55
Número de fases	3
Tensión	220 V AC
Frecuencia	60 Hz
Potencia	5 kW
Velocidad	3600 rpm
Cos δ	0.8
Conexión	Delta-Estrella

Mediante los valores de placa obtenidos del generador se definirán los valores nominales para obtener la corriente nominal del generador síncrono

$$P_{nom} = 5 \text{ kW}$$

$$V_{L\ nom} = 220 \text{ V}$$

$$V_{a\ nom} = 127 \text{ V}$$

La fórmula para el cálculo de la potencia aparente nominal se detalla a continuación

$$\cos(0.8) = \frac{P_{nom}}{S_{nom}}$$

Entonces

$$S_{nom} = \frac{5000}{0.8}$$

$$S_{nom} = 6.25 \text{ kVA}$$

La fórmula para el cálculo de la corriente nominal se detalla a continuación

$$I_{nom} = \frac{P_{nom}}{\sqrt{3} * V_{nom}}$$

Entonces

$$I_{nom} = \frac{5 * 10^3}{\sqrt{3} * 200}$$

$$I_{nom} = 13.12 A \approx 13 A$$

Los valores base son designados como los valores de placa del generador entonces:

$$S_{base} = 6.25 kVA$$

$$V_{base} = 127 V$$

Para obtener la curva de capacidad se necesita de los valores de Potencia e Intensidad con limitaciones de funcionamiento mencionadas con anterioridad, estas limitaciones provocan la desincronización y saturación de la máquina. Entonces se determina el diagrama fasorial con los valores obtenidos, relacionando el voltaje en bornes, la corriente que se encuentra en desfase de 90 grados respecto al voltaje por ser la corriente inductiva, la corriente de la inductancia adelantada 90 grados por el valor en j , para así encontrar el vector del voltaje inducido, con las pruebas de cortocircuito y las pruebas en vacío realizadas al generador síncrono se determinan las reactancias del eje directo y cuadratura en por unidad para poder realizar la simulación debido a que el generador síncrono no presenta datos completos de las características de placa.

Para la obtención de datos característicos y parámetros del generador síncrono en estado estable se realizan las siguientes pruebas:

5.1. Determinar los parámetros del generador síncrono en estado estable

5.1.1. Prueba del circuito abierto del generador síncrono

Para las pruebas de circuito abierto en el generador se debe realizar en vacío, para poder representar la correlación del flujo del entre hierro que produce los devanados del inductor y en los terminales del estator debido a que está inducida por una fuerza electromotriz.

Las pruebas en circuito abierto se las realiza tomando valores de corrientes en el devanado de campo y voltajes de fase-neutro en las salidas del generador mediante una pinza amperimétrica dichos valores se presenta en la Tabla 5.2., para medir estos valores se los realiza cuando el generador esté operando a velocidades síncronas y en circuito abierto.

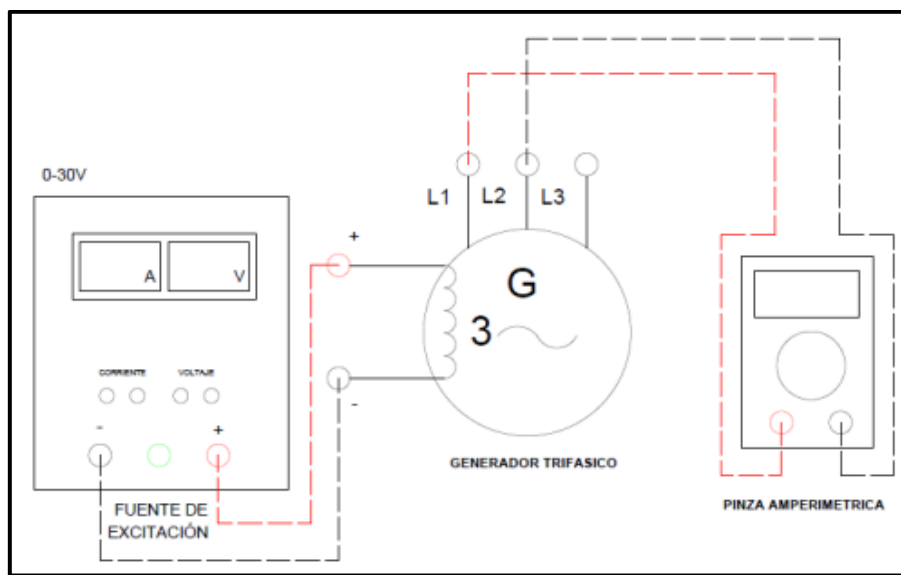


Figura 5.1. Conexión de los elementos para la toma de datos en vacío o circuito abierto.

La recolección de información para obtener la curva de capacidad, requiere los valores de potencia activa y reactiva, estos valores son calculados mediante los valores de voltaje y corriente de alimentación.

Se indica la información de voltaje, frecuencia, corriente de armadura, corriente de campo en un tiempo de 29 minutos de operación en el que se incrementa los valores de voltaje y corriente de alimentación cada minuto, para las pruebas realizadas.

Tabla 5.2. Valores de las pruebas realizadas en vacío.

Pruebas N°	VACIO		VACIO	VACIO
	Voltaje de línea (V)	Frecuencia (Hz)	Corriente de campo (A)	Voltaje de fase-neutro (V)
1	55,5	59,95	0,07	32,04
2	62,9	59,96	0,08	36,32
3	66,6	59,96	0,09	38,45
4	73,7	59,96	0,1	42,55
5	99,6	59,96	0,12	57,5
6	111,2	59,97	0,14	64,2
7	128,3	59,97	0,16	74,07
8	141,9	59,97	0,18	81,93
9	158,2	59,97	0,2	91,34
10	198,8	59,97	0,27	114,78
11	217,7	59,97	0,3	125,69
12	222,9	59,97	0,32	128,69
13	228,4	59,95	0,34	131,87
14	232,4	59,95	0,36	134,18
15	236,5	59,95	0,37	136,54
16	237,5	59,95	0,38	137,12

17	240,1	59,95	0.39	138.62
18	242	59,95	0.4	139.72
19	244,3	59,95	0.41	141.05
20	246,8	59,95	0.42	142.49
21	248,6	59,95	0.43	143.53
22	250,8	59,96	0.44	144.8
23	252,1	59,95	0.45	145.55
24	253,5	59,95	0.46	146.36
25	256,7	59,95	0.47	148.21
26	257,8	59,95	0.48	148.84
27	260,3	59,95	0.49	150.28
28	260,8	59,95	0.5	150.57
29	262,8	59,95	0.51	151.73

En la Tabla 5.2., se registran los resultados obtenidos a partir de la prueba realizada al generador en vacío, esto se lo realizó midiendo el voltaje generado hasta que sobrepase su valor nominal, los valores son escogidos mediante la Figura 5.2. debido a que presenta una severa inclinación hacia la saturación en el hierro.

Esta prueba se basa en dar valores que sobrepasen los voltajes nominales del generador para poder verificar cómo se comporta la saturación en el entrehierro basado en la conexión de la Figura 5.1 y la gráfica representativa de los valores obtenidos se presenta en la Figura 5.2.

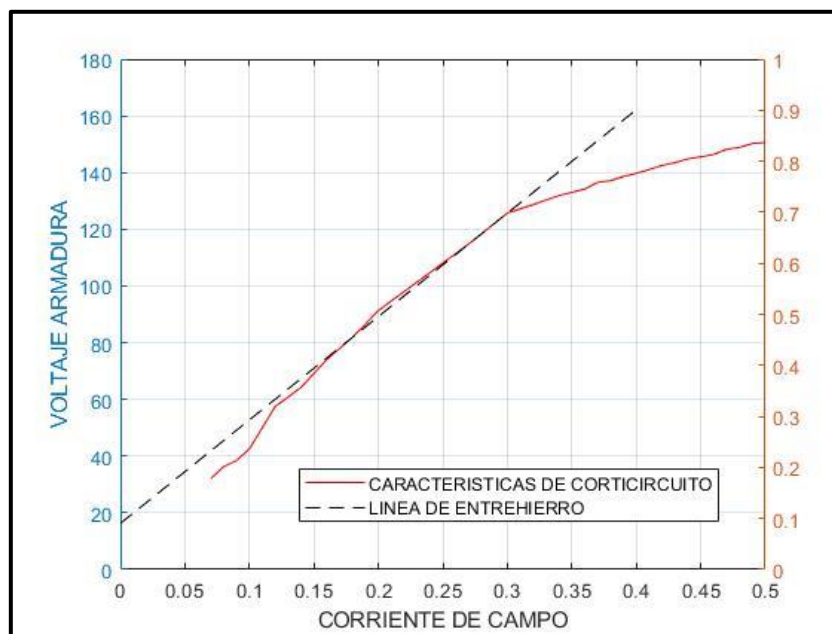


Figura 5.2. Curva del circuito abierto con respecto al entre hierro.

La Figura 5.2 muestra el comportamiento del generador síncrono, es decir, la relación que tiene la curva de la prueba realizada con respecto al entre hierro donde se puede apreciar que al momento que tiene una tensión de 128 V aproximadamente, la curva empieza a declinarse de tal forma que se pueda observar la saturación en el hierro.

5.1.2. Prueba de cortocircuito en el generador síncrono

Para obtener los valores de las pruebas en cortocircuito se debe determinar la relación entre las corrientes de cortocircuito y las de excitación, debido a que la fuerza magneto motriz (f.m.m) o también llamada potencial magnético, su saturación es muy baja y su gráfica lineal, como resultado la f.m.m del entrehierro sea baja.

Las pruebas en cortocircuito se las realiza cortocircuitando las salidas del generador tomando valores de corrientes de armadura mediante una pinza amperimétrica, dichos valores se presentan en la Tabla 5.3.

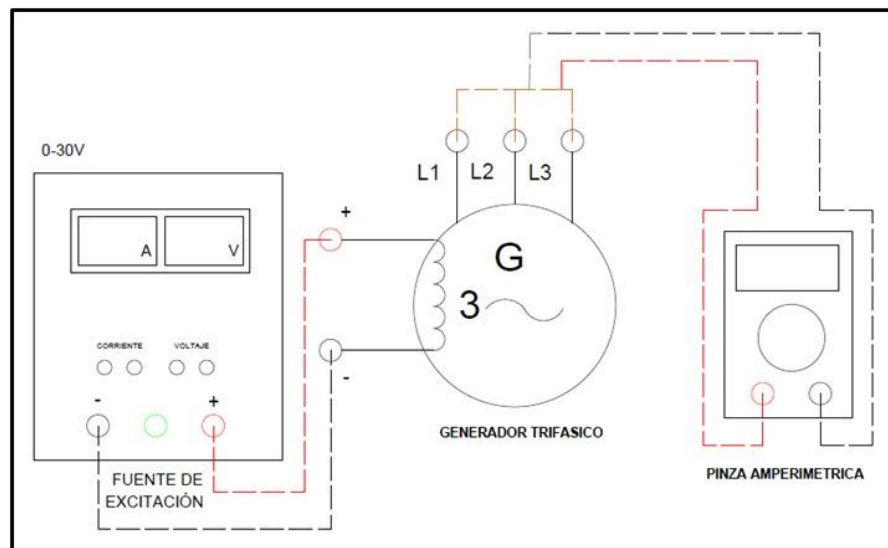


Figura 5.3. Conexión de los elementos para la toma de datos en cortocircuito.

Esta prueba se basa en tener un circuito cortocircuitado en las salidas del generador para poder verificar valores de corriente, en esta práctica se basa en la conexión de la Figura 5.3 la cual toma los datos de las corrientes de armadura convenientes a obtener los valores de corriente de campo, para la obtener la Figura 5.4 se toma en cuenta los valores de corriente obtenidas en la Tabla 5.3., dando como resultado una gráfica lineal, con su respectiva ecuación de la recta.

Tabla 5.3.Valores de las pruebas en cortocircuito.

PRUEBAS DE CORTOCIRCUITO								
	CORRIENTE DE ARMADURA	CORRIENTE DE CAMPO		CORRIENTE DE ARMADURA	CORRIENTE DE CAMPO		CORRIENTE DE ARMADURA	CORRIENTE DE CAMPO
	[A]	[A]		[A]	[A]		[A]	[A]
1	0,4	0,01	38	5,6	0,41	75	11,0	0,78
2	0,5	0,02	39	5,7	0,42	76	11,2	0,79
3	0,6	0,03	40	5,8	0,43	77	11,3	0,8
4	0,8	0,04	41	6	0,44	78	11,5	0,81
5	1	0,06	42	6,2	0,45	79	11,6	0,82
6	1,3	0,09	43	6,3	0,46	80	11,8	0,83
7	1,5	0,1	44	6,4	0,47	81	11,9	0,84
8	1,6	0,11	45	6,5	0,48	82	12,1	0,85
9	1,7	0,12	46	6,7	0,49	83	12,2	0,86
10	1,9	0,13	47	6,8	0,5	84	12,4	0,87
11	2	0,14	48	7	0,51	85	12,5	0,88
12	2,2	0,15	49	7,1	0,52	86	12,7	0,89
13	2,3	0,16	50	7,3	0,53	87	12,8	0,9
14	2,5	0,17	51	7,4	0,54	88	13,0	0,91
15	2,5	0,18	52	7,6	0,55	89	13,1	0,92
16	2,7	0,19	53	7,7	0,56	90	13,3	0,93
17	2,9	0,2	54	7,9	0,57	91	13,4	0,94
18	3	0,21	55	8,0	0,58	92	13,6	0,95
19	3,1	0,22	56	8,2	0,59	93	13,7	0,96
20	3,2	0,23	57	8,3	0,6	94	13,9	0,97
21	3,4	0,24	58	8,5	0,61	95	14,0	0,98
22	3,5	0,25	59	8,6	0,62	96	14,2	0,99
23	3,7	0,26	60	8,8	0,63	97	14,3	1
24	3,8	0,27	61	8,9	0,64	98	14,5	1,01
25	3,9	0,28	62	9,1	0,65	99	14,6	1,02
26	4	0,29	63	9,2	0,66	100	14,8	1,03
27	4,1	0,3	64	9,4	0,67	101	14,9	1,04
28	4,2	0,31	65	9,5	0,68	102	15,1	1,05
29	4,4	0,32	66	9,7	0,69	103	15,2	1,06
30	4,5	0,33	67	9,8	0,7	104	15,4	1,07
31	4,6	0,34	68	10,0	0,71	105	15,5	1,08
32	4,8	0,35	69	10,1	0,72	106	15,7	1,09
33	4,9	0,36	70	10,3	0,73	107	15,8	1,1
34	5,1	0,37	71	10,4	0,74	108	16,0	1,11
35	5,2	0,38	72	10,6	0,75	109	16,1	1,12
36	5,3	0,39	73	10,7	0,76	110	16,3	1,13
37	5,53	0,41	74	10,86	0,77			

En la Tabla 5.3., se registran los valores obtenidos mediante la prueba de cortocircuito al generador, estos valores son tomados hasta que la corriente de campo sea el 125 % de su valor nominal, la Figura 5.4. presenta una tendencia lineal debido a la relación entre la corriente de campo y la corriente de armadura, esta recta presenta una ecuación $Y = 0.0696x + 0.0095$, la cual deduce que la corriente de campo es 1.13 A y la corriente de armadura 16.3 A.

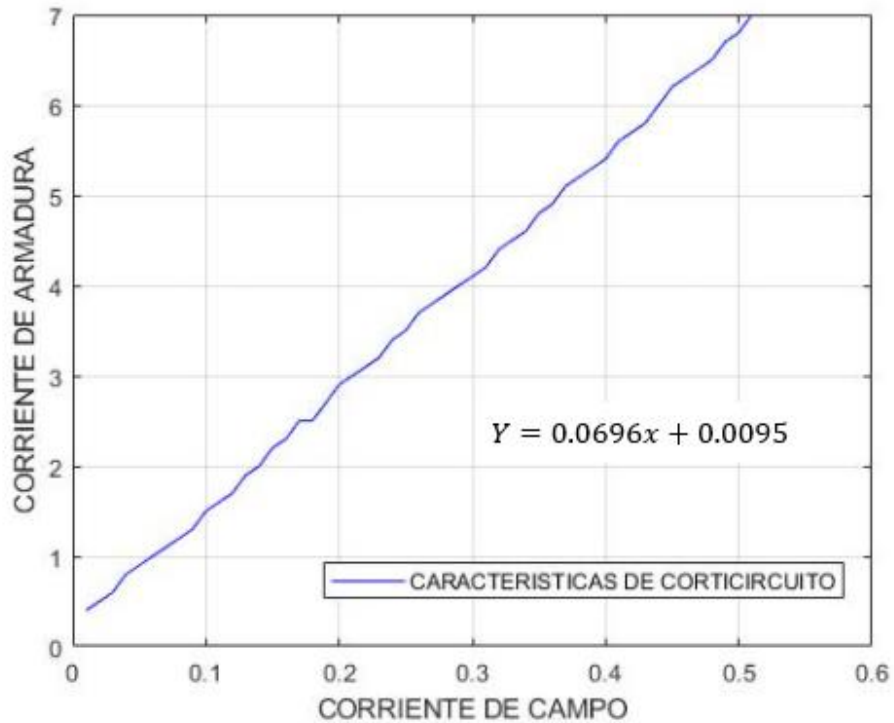


Figura 5.4. Curva del generador síncrono en cortocircuito.

Una vez realizado las pruebas correspondientes se procese a determinar las reactancias síncronas tanto en el eje directo como el eje de cuadratura.

5.2. Cálculo de la reactancia síncrona del eje directo del generador

Los parámetros y datos que se obtuvieron en las pruebas de circuito abierto y circuito cerrado facilitan el cálculo para determinar la reactancia del eje directo, la Figura 5.5 muestra las características de las dos pruebas facilitando el análisis de las variables que se están interviniendo.

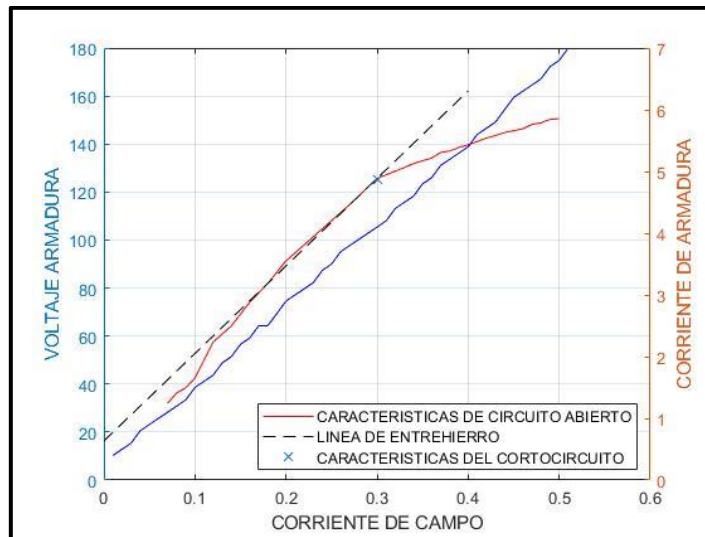


Figura 5.5. Curvas del circuito abierto y circuito cerrado.

En la Figura 5.5 se muestra las curvas de las pruebas realizadas al generador estas pruebas se las realiza para el cálculo de las reactancias síncronas de los ejes de la máquina síncrona a continuación se calcula la reactancia síncrona en el eje directo (X_d) tomando en cuenta los voltajes de fase-neutro (V_a) el cual presenta en su curva la saturación que corresponde a la corriente de campo nominal y a la vez a la corriente de cortocircuito ($I_{a_{cc}}$) de la armadura.

$$X_d = \frac{V_a}{I_{a_{cc}}}$$

$$X_d = \frac{144.8}{6}$$

$$X_d = 24.13 \Omega$$

5.3. Cálculo de la reactancia síncrona del eje cuadratura del generador

Los parámetros que se obtuvieron mediante las pruebas que se le realizó al generador nos facilitan el cálculo para la reactancia síncrona del eje de cuadratura en la Figura 3.7 se muestra el circuito equivalente del generador síncrono y en la Figura 3.14 se muestra el diagrama de flujos o el fasor respecto a rotor de polos salientes.

Los valores obtenidos en las prácticas realizadas al generador son: voltajes en vacío, voltajes corrientes con carga y corrientes de armadura los cuales se miden en las salidas del generador síncrono

Tabla 5.4. Características para el cálculo de la reactancia en cuadratura (X_q)

VALORES			
PARÁMETROS	BASE	REALES	POR UNIDAD [p.u.]
Voltaje en vacío [V]	127	128.7	1.01
Corriente [A]	13	3.07	0.24
Voltaje terminales [V]	127	121.80	0.94
X_d [Ω]	7.74	24.13	3.12

En la Tabla 5.4 indica los parámetros o características de los datos para el cálculo respectivo del eje de cuadratura.

El ángulo interno de la máquina se obtiene a partir de la ecuación (3.8)

$$E = jX * I + Va$$

$$E = 3.12 * 1\angle 36.87^\circ + 1\angle 0^\circ$$

$$E = 4.62\angle 29.41^\circ$$

La reactancia de cuadratura comprende entre el 0.60 y 0.70 de la reactancia directa, entonces aproximamos dichos valores

$$X_q = 0.65 * X_d$$

$$X_q = 0.65 * 3.12$$

$$X_q = 2.03 \text{ p.u.}$$

Tabla 5.5. Valores resultantes de la reactancia del eje de cuadratura.

Datos	Valor resultante
δ	29.41°
X_q	2.03 p.u.
	15.71 [Ω]

En la Tabla 5.5 indica los valores calculados de la reactancia de eje de cuadratura.

5.4. Límites de operación del generador síncrono

Estos límites de operación tienen restricciones eléctricas como mecánicas, los cuales definen la operación del generador como por ejemplo en una central hidroeléctrica, las principales características o elementos que forman un SEP básicamente es un generador, líneas y sistemas externos etc.

La curvas de capacidad o curva de capacidad de la máquina síncrona muestra la operación segura y estable, en base a los valores nominales o de la placa característica, para poder entrar en operación se realizan pruebas tanto en laboratorios o en campo, obteniendo las corrientes y límites eléctricos como corriente máxima de armadura y de campo así como también, los límites mecánicos y dentro de estos límites se encuentran las potencias mínimas y máxima para poder referenciar cuando un generador esta sobre excitado o sub excitado y como resultado poder graficar los límites y cuadrantes en donde el generador puede operar ya que el generador puede estar entregando reactivos o absorbiendo reactivos.

Tabla 5.6.Datos obtenidos de las pruebas del generador.

Parámetros	Magnitud	Unidad
Potencia Aparente	6.250	kVA
Potencia Activa	5	kW
Potencia Reactiva	3.749	kVAr
Factor de potencia	0.8	
Frecuencia	60	Hz
Velocidad	3600	r.p.m
Voltaje	220	V
Corriente de campo	1.13	A
Corriente de armadura	16.3	A
Reactancia en eje Directo X_d	24.13	Ω
Reactancia en eje cuadratura X_q	15.71	Ω

En la siguiente Tabla 5.4 indica los valores obtenidos mediante las pruebas que se realizó al generador síncrono principalmente en estado estable con las correctas unidades y cálculos en por unidad.

En este punto se especifican los valores utilizados en por unidad.

$$S_{base} = 6.25 \text{ kVA}$$

$$V_{base} = 220 \text{ V}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(220)^2}{6250}$$

$$Z_{base} = 7.74 \Omega$$

Reactancia del eje directo en por unidad.

$$X_d = \frac{24.13}{7.74}$$

$$X_d = 3.12 \text{ p.u}$$

Reactancia del eje de cuadratura por unidad.

$$X_q = \frac{15.71}{7.74}$$

$$X_q = 2.03 \text{ p.u}$$

Cálculo en por unidad de la potencia activa y reactiva del generador síncrono tomando como referencia la potencia aparente en por unidad.

Potencia activa nominal

$$P_{nom} = \frac{5000 \text{ kW}}{6250 \text{ KVA}}$$

$$P_{nom} = 0.8 \text{ p.u}$$

Potencia reactiva nominal

$$Q_{nom} = \frac{3749 \text{ kVAR}}{6250 \text{ KVA}}$$

$$Q_{nom} = 0.60 \text{ p.u.}$$

5.5. Límites mecánicos para el diseño de la curva de capacidad

5.5.1. Potencia máxima de la máquina motriz (Motor)

Se define por la potencia nominal de la máquina motriz que dará movimiento al generador que puede ser una turbina, al momento, que esta máquina entrega potencia en las entradas del generador se consideran las pérdidas, para esta potencia se calculó anteriormente teniendo como resultado 5 Kw y en por unidad 0.8 p.u.

5.5.2. Potencia mínima de la máquina motriz (Motor)

La potencia mínima de la máquina motriz se debe a las condiciones de eficiencia debido a las pérdidas que se encuentran en el bobinado de cobre, dichas pérdidas se presentan en el entre hierro, estator, rotor y por las pérdidas de rotación.

Para obtener los valores de las pérdidas en el cobre del estator se toman los valores nominales de la corriente.

$$P_{pérdidas} = I^2 * r_a$$

$$P_{pérdidas} = 13^2 * 0.478$$

$$P_{pérdidas} = 80.78 \text{ W}$$

$$P_{pérdidas} = \frac{80.78}{6250}$$

$$P_{pérdidas} = 0.0129 \text{ p.u.}$$

Para calcular la potencia mínima se debe tener en cuenta que se asume un 20% de la potencia nominal.

$$P_{min} = 20\%P_{nom} + P_{pérdidas}$$

$$P_{min} = 20\% * 5000 \text{ W} + 80.78 \text{ W}$$

$$P_{min} = 1.080 \text{ KW}$$

$$P_{min} = \frac{1.080 \text{ KW}}{6.250 \text{ KVA}}$$

$$P_{min} = 0.1729 \text{ p.u.}$$

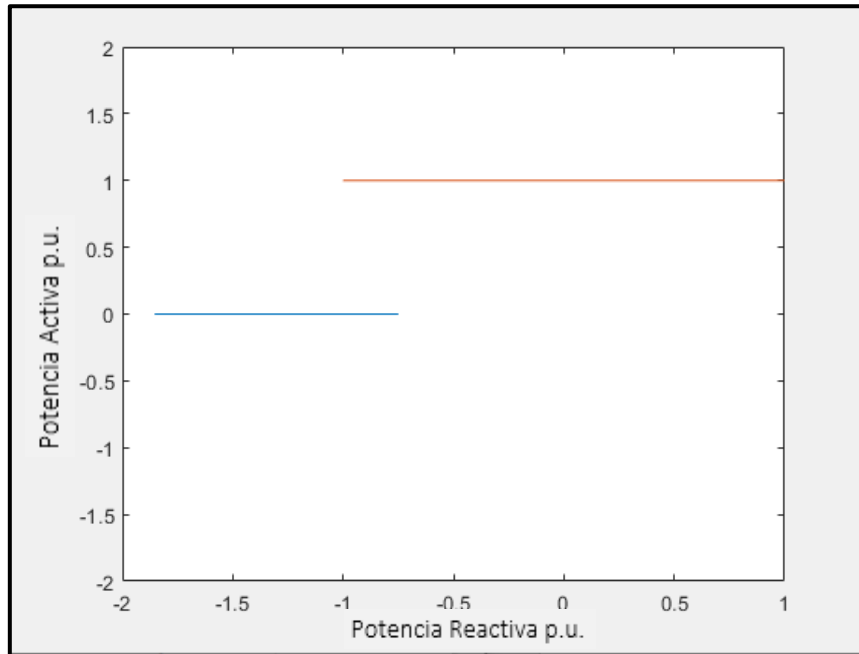


Figura 5.6. Es una representación de la potencia máxima y mínima.

En la Figura 5.6 se indica los límites mecánicos tanto máximos como mínimos que puede llegar a operar el generador, estos límites son producidos por una turbina o una máquina motriz.

5.5.6. Límites eléctricos para la curva de capacidad

En estos límites eléctricos se basan en las ecuaciones de los generadores de rotor de polos salientes, en las prácticas de cortocircuito y en vacío se realizaron los cálculos para poder determinar las reactancias del generador sincrónico, en las soluciones se puede identificar que el eje directo (X_d) es mayor que la reactancia en cuadratura (X_q).

5.5.7. Límite de corriente en los devanados de armadura

Estos límites se basan en el calentamiento de las bobinas del estator, ya que estos bobinados se exponen a temperaturas máximas, con el fin de poder buscar las zonas seguras en donde pueda operar el generador ya que estas corrientes se vinculan con las corrientes nominales del estator,

este límite de corriente en los devanados nos permite identificar el lugar geométrico de la curva de capacidad del generador basándose en la potencia reactiva Q y el factor de potencia tanto en adelanto como en atraso, se debe tomar en cuenta que la potencia aparente es igual al valor nominal.

$$S = 1 \text{ p.u.}$$

$$Q = s * \text{sen}(\cos^{-1}(fp))$$

Esta fórmula se basa en la obtención de parámetros del generador al operar con distintos factores de potencia y para el cálculo de la potencia activa se tiene que:

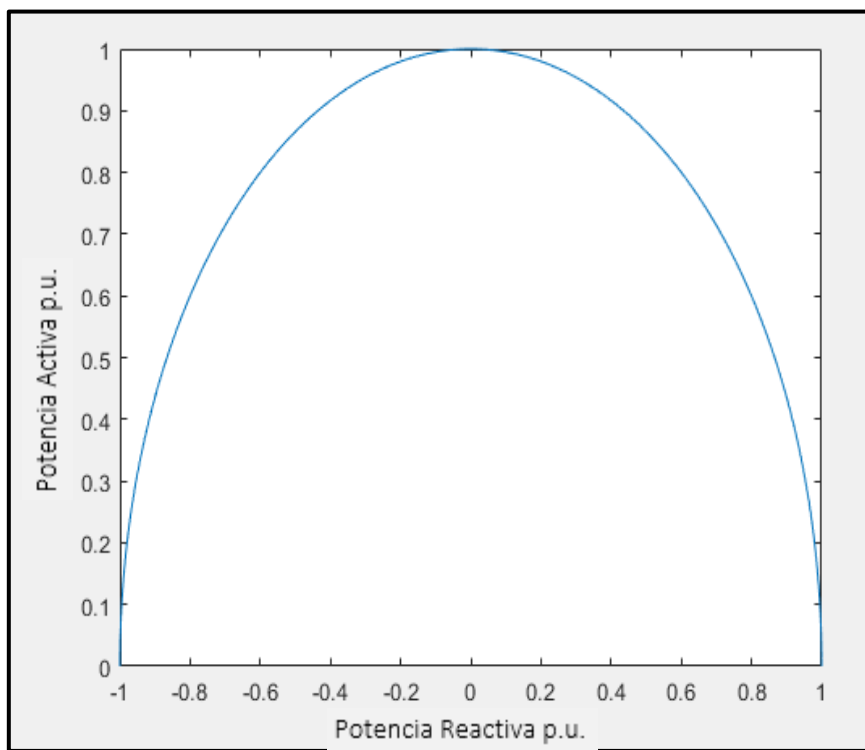


Figura 5.7. Límite geométrico del calentamiento del estator.

En la Figura 5.7 indica los valores de potencia activa y reactiva mediante una semicircunferencia que parte del origen abarcando las zonas de operación del generador tanto en las regiones de sub excitado y sobreexcitado

5.5.8. Límite máximo de la corriente en los devanados

En estos límites la corriente máxima tiene restricciones en el calentamiento de los devanados del rotor y ya no del estator ya que este indica la zona de operación del generador sobreexcitado, para poder visualizar de mejor manera el lugar geométrico, es imprescindible la corriente máxima de

excitación, ya que esta se utiliza para obtener los valores internos del generador síncrono (E_{max}) con los parámetros de carga nominal.

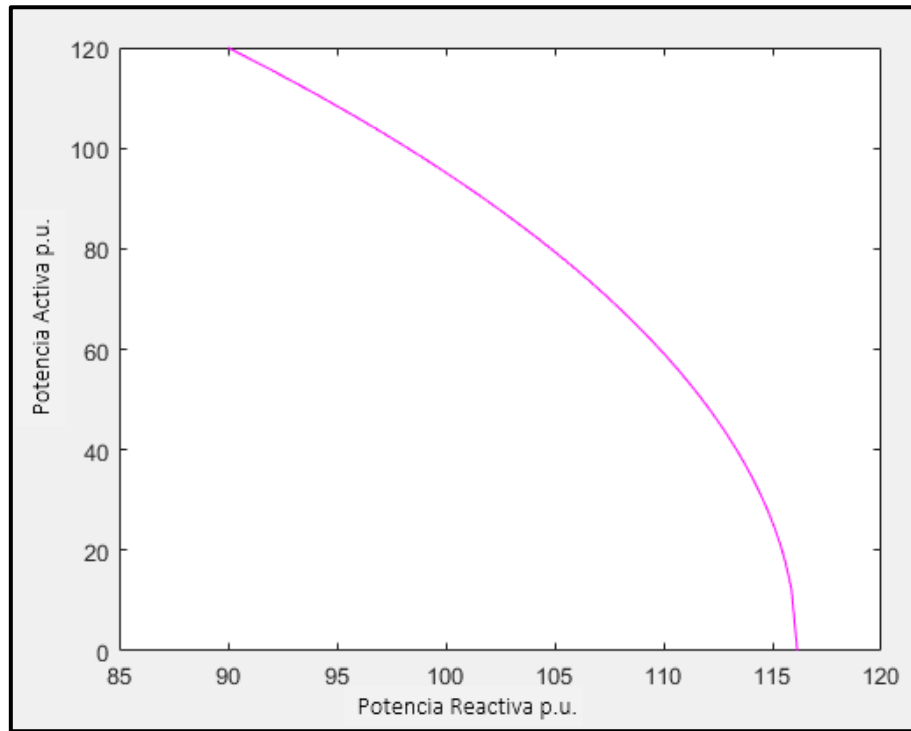


Figura 5.8. Límite geométrico máximo del calentamiento del rotor.

5.5.9. Límite mínimo de corriente de campo

En este límite mínimo de corriente se determina la zona de operación del generador sub excitado mediante los límites de corriente nominal tomando como voltajes internos los valores mínimos E_{min} , estos valores se los toma mediante la placa característica del generador para que su función sea segura al momento de estar en sincronismo, para los cálculos se toma el 10 % del valor nominal correspondiente a la corriente de campo.

$$E_{min} = 10\% E_{nom}$$

$$E_{min} = 10\% * 4.62 p. u.$$

$$E_{min} = 0.46 p. u.$$

Mediante el ángulo máximo y el voltaje interno mínimo, se realiza el cálculo de la potencia activa y la derivada del ángulo máximo

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{V * E_{min}}{X_d} * \cos(\delta_{max}) + V^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(2\delta_{max}) = 0$$

$$\frac{0.46 * 1}{3.12} * \cos(\delta_{max}) + 1^2 \left(\frac{1}{2.03} - \frac{1}{3.12} \right) \cos(2\delta_{max}) = 0$$

$$\delta_{max} = 76.4^{\circ}$$

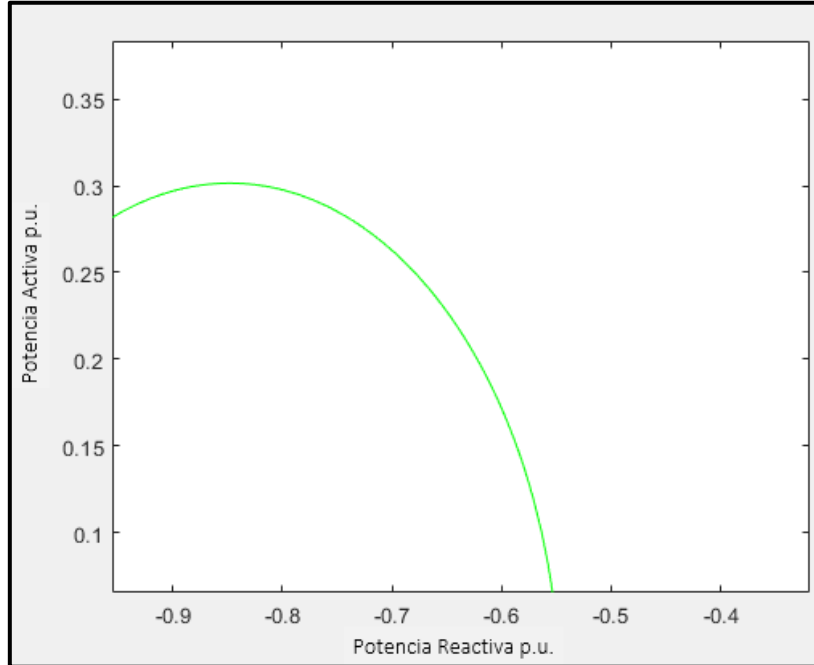


Figura 5.9. Límite geométrico mínimo de la corriente de campo.

En la Figura 5.9 indica la zona geométrica del límite de la corriente de campo mínima, esto se da mediante el valor de ángulo de potencia máximo que puede ir variando desde 0 hasta el ángulo máximo calculado en las ecuaciones de potencia activa y reactiva del generador síncrono de rotor de polos salientes.

5.5.10. Límite en estado estable

El límite en estado estable de una máquina síncrona asegura que su funcionamiento pueda operar en sincronismo sin ser inestable ya que esta puede perder su sincronismo al momento de conectarle cargas en las salidas del generador, en este límite se regula la potencia activa reservada con el fin de poder absorber ciertas cantidades potencia para poder alcanzar un margen de estabilidad.

Se tiene un margen de seguridad práctico en estado permanente que es de 10%, para poder determinar la zona geométrica en estado estable se debe realizar un proceso con respecto a la potencia de operación, el cual consiste en variar dicha potencia que está trabajando el generador hasta poder llegar a la potencia mínima mediante:

$$P_i = P_{max1} - MEEE * P_{nom}$$

$$P_i = 0.8 - 0.10 * 0.8$$

$$P_i = 0.72 \text{ p.u.}$$

Es primordial obtener el voltaje interno máximo como también ángulo de potencia utilizando las ecuaciones no lineales para poder obtener la zona geométrica del límite en estado estable, utilizando la ecuación 3.21

$$P_{max} = \frac{E_1 * V}{X_d} (\text{sen} \delta^*) + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) (\text{sen} 2\delta^*)$$

$$\frac{\partial P_0}{\partial \delta_0} = \frac{V * E_1}{X_d} \cos(\delta^*) + V^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos(2\delta^*) = 0$$

$$0.8 = \frac{E * 1}{3.12} (\text{sen} \delta^*) + \frac{1^2}{2} \left(\frac{1}{2.03} - \frac{1}{3.12} \right) (\text{sen} 2\delta^*)$$

Se realizan los cálculos pertinentes para la obtención de las variables de E_1 y δ^* se obtienen.

$$E_1 = 4.92$$

$$\delta^* = 86.23^\circ$$

En este proceso de se establece el ángulo de la potencia activa para la potencia de operación utilizando el valor de E_1 ya calculado anteriormente.

$$0.72 = \frac{4.92 * 1}{3.12} (\text{sen} \delta_0) + \frac{1^2}{2} \left(\frac{1}{2.03} - \frac{1}{3.12} \right) (\text{sen} 2\delta_0) = 0$$

$$\delta_0 = 62.43^\circ$$

Mediante la ecuación 3.22 se calcula la potencia reactiva de operación (Q_0) con los valores de E_{max1} y δ_0 obteniendo así un par ordenado.

$$Q_0 = \frac{1 * 2.06}{3.12} \cos(62.43^\circ) + \frac{1^2}{2} \left(\frac{1}{2.03} - \frac{1}{3.12} \right) \cos(2 * 62.433^\circ) - \frac{1^2}{2} \left(\frac{1}{2.03} + \frac{1}{3.12} \right)$$

$$Q_0 = -0.1804 \text{ p.u.}$$

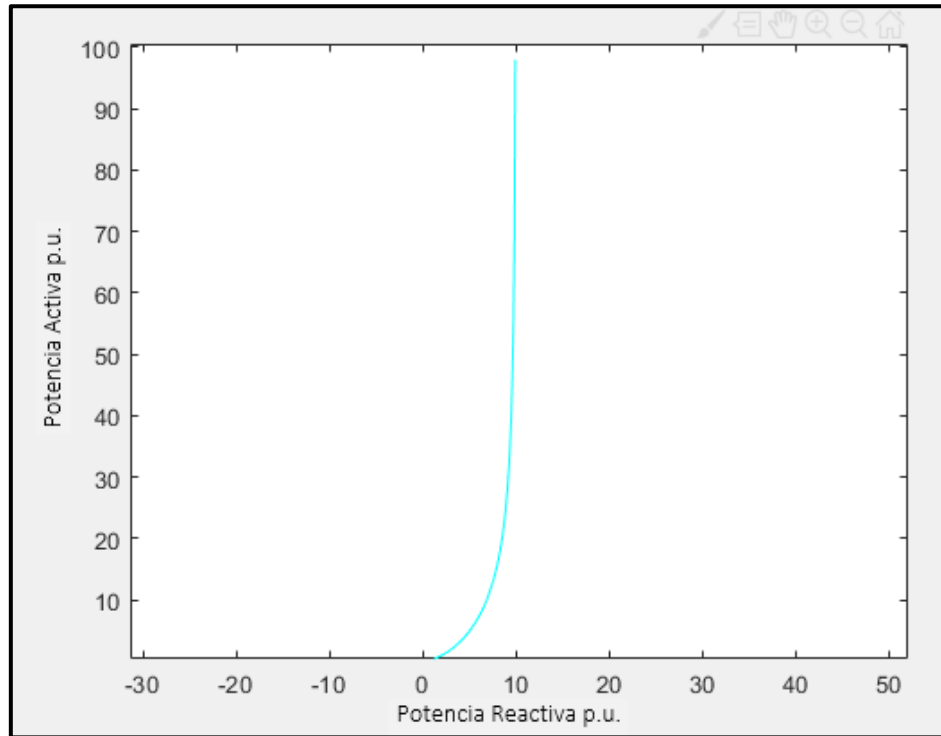


Figura 5.10. Límite geométrico del margen en estado estable.

En la Figura 5.10 indica el lugar geométrico MEE el cual nos indica el límite en donde el generador puede operar en estado estable y que su sincronismo en la generación opere sin ser inestable caso contrario tiende a salirse del sincronismo.

5.6. Diagrama de flujo para la realización de la curva de capacidad

Una vez contextualizado los cálculos y los gráficos resultantes se proceden a indicar el proceso de la interfaz realizada mediante el diagrama de flujo de la Figura 5.11., la interfaz tiene 3 ventanas.

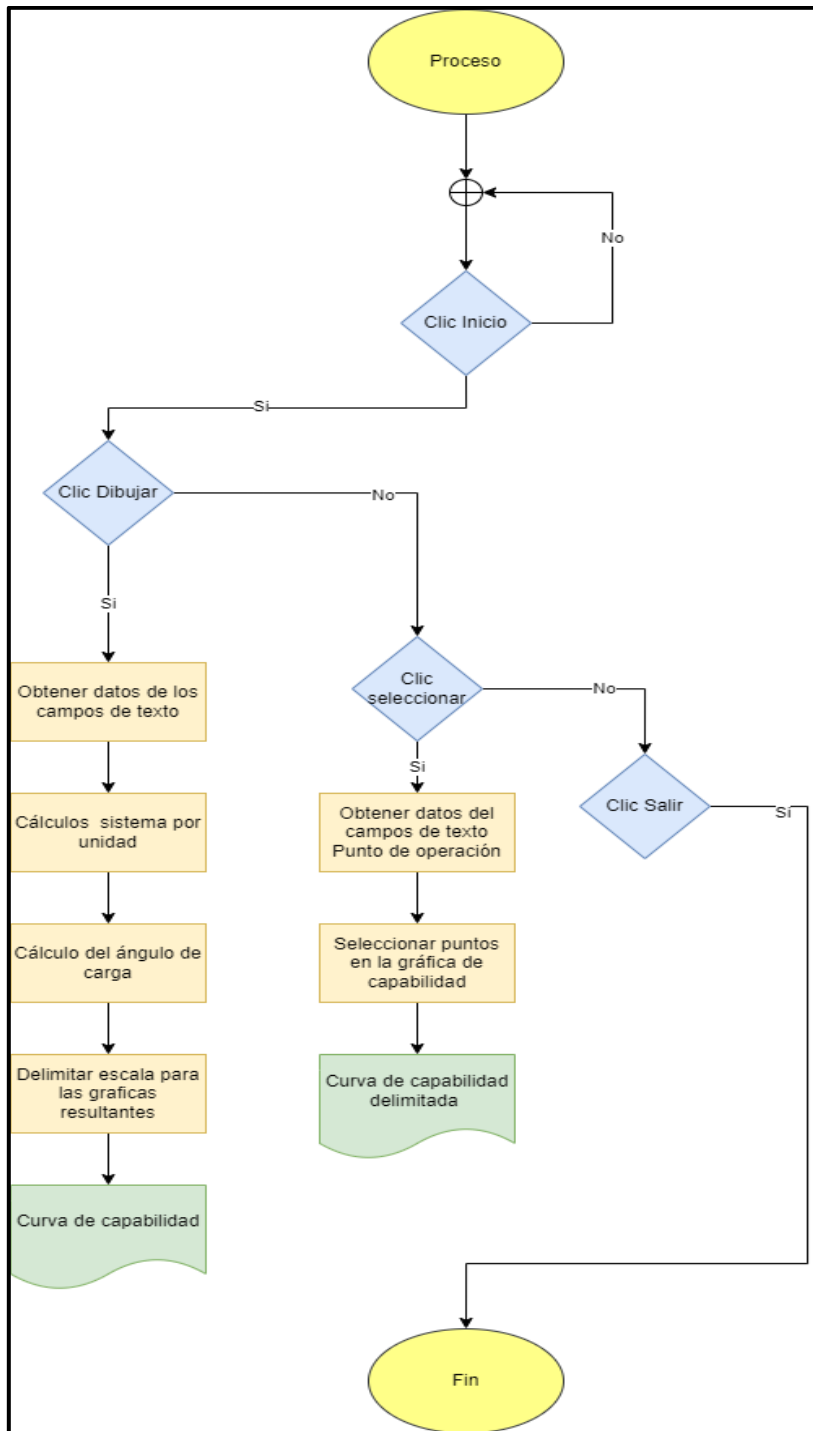


Figura 5.11. Diagrama de flujo.

La primera ventana de la Figura 5.12., se denomina inicio y se muestra información acerca de la universidad y de los autores con dos botones para empezar y salir, el botón de empezar está vinculado con la siguiente ventana llamada proceso.



Figura 5.12. Ventana de inicio de la simulación.

En la ventana de proceso de la Figura 5.12., se utiliza la función `str2num` para convertir los valores ingresados en los campos de texto de frecuencia del sistema, corriente de campo, factor de potencia, reactancia sincrónica del eje de cuadratura y directo, voltaje y corriente nominal, potencia mecánica máxima, Corriente de armadura máxima, potencia aparente, velocidad, corriente de excitación.

Esta función permite pasar los datos de tipo carácter a un valor numérico para realizar los respectivos cálculos como se indica en la Figura 5.13.

```

261 function dibujar_Callback(hObject, eventdata, handles)
262 % Lectura de datos
263 axes(handles.axes2)
264 cla
265 global f Ic fdp Xq Xd Vn Pturbina In Sn Iexcnom Imax punto
266 f = str2num(get(handles.datoF,'str')); % frecuencia del sistema
267 Ic = str2num(get(handles.datoIF,'str')); % Corriente de campo
268 fdp = str2num(get(handles.datoAP,'str')); % factor de Potencia
269 Xq = str2num(get(handles.datoXq,'str')); % Reactancia sincrónica eje cuadratura
270 Xd = str2num(get(handles.datoXd,'str')); % Reactancia sincrónica eje directo
271 Vn = str2num(get(handles.datoVF,'str')); % Voltaje nominal
272 Pturbina = str2num(get(handles.datoPMec,'str')); % Potencia mecánica máxima, límite de potencia
273 In = str2num(get(handles.datoIamax,'str')); % Corriente de armadura máxima, límite de corriente
274 Sn = str2num(get(handles.datoS,'str')); % Potencia aparente
275 Iexcnom = str2num(get(handles.datoIexc,'str')); % Potencia aparente
276 Velocidad = str2num(get(handles.datoRPM,'str')); % Velocidad
277 Imax = str2num(get(handles.datoIamax,'str')); % Corriente Nominal del generador
278 Iexcmax = 2 * Iexcnom
279 Iexcmin = Iexcnom / 10
280 LimPrac = 15
281
282 % Constantes
283 N = 100;
284 B = 0.02500;
285 K = 0.9340;
286 aP = 0:0.1:2*pi;
287
288 % Determinación de valores base para sistema por unidad
289 Vb = Vn * sqrt(3);
290 Sb = Sn;

```

Figura 5.13. Obtener datos de los campos de texto.

Cada botón tiene una función denominada Callback como se muestra en la misma figura anterior la cual permite ingresar todas las líneas de código que se ejecutarán al dar clic sobre este.

Al dar clic en el botón de Dibujar de la ventana proceso como se indica en la Figura 5.14., estos datos obtenidos se convierten al sistema por unidad, el cuál consta del cociente entre el valor nominal y el valor base elegido.

Figura 5.14. Ventana para el ingreso de datos característicos del generador.

El valor numérico de los parámetros eléctricos (tensiones, potencias, impedancias, corrientes) para un análisis de un Sistema Eléctrico de Potencia, está generalmente expresado en un valor relativo, ya sea en por ciento [%] o en por unidad [pu]. Esto resulta como consecuencia de referenciar los valores absolutos de dichos parámetros dados en kV, MW, Ω , kA a sus correspondientes valores bases, esta conversión en el código se indica en la Figura 5.15.

```

287
288 % Determinación de valores base para sistema por unidad
289 Vb = Vn * sqrt(3);
290 Sb = Sn;
291 Ib = Sb / Vb * 10 ^6; % Potencia base en MVA
292
293 % Cálculo sistema por Unidad
294 Sa = Sn / Sb;
295 Va = Vn * sqrt(3) / Vb;
296 Ia = Sb / Vb * 10^6 / Ib;
297 Ppu = Pturbinas / Sb;
298 xd = Xd ;
299 xq = Xq ;
300
301 % ángulo de potencia
302 angp = acos (fdp);
303 angP = angp * 180 / pi;
304 % angulo de carga
305 angc = atan((xq*Ia*fdp) / (Va + xq * Ia *sin(angp)));
306 angC = angc * 180 / pi;
307
308 % fuerza electromotriz inducida
309
310 Ef = Va * cos(angc) + xd * Ia * sin(angp + angc);
311 A = ((Va^2) / 2) * (xd + xq) / xd / xq;
312 B = ((Va^2) / 2) * (xd - xq) / xd / xq;
313 C = Ef * Va / xd;
314
315 angm = acos(sqrt((C / 8 / B)^2+(1/2))-(C / 8 / B));
316 angM = angm * 180 / pi;
317

```

Figura 5.15. Conversión a sistema por unidad.

Para la gráfica de la curva para determinar el límite del rotor se utiliza los valores del valor de voltaje o tensión en bornes máximo, para ser exacto se realiza una circunferencia con dos puntos el centro que coincide con el centro del sistema de referencia y el punto final de E_{fmax} , el valor de la potencia máxima restringe esta curva desde la parte superior, el cuál es una constante y gráficamente una línea paralela al eje Y, por el lado izquierdo se delimita por el ángulo de carga, dicha parábola indica el valor practico del límite de estabilidad permanente.

Mediante la programación en Matlab se puede dar estilo a cada una de las líneas o curvas de las gráficas como se indica en la Figura 5.16., con las funciones Linewidth para el ancho de la línea, Marker Size, Edge Color, Face Color, los cuales permiten modificar los marcadores de cada punto con el fin de resaltar dicho valor gráficamente, los valores de colores de colores se rigen a letras como b para azul, g para verde y r para el color rojo, adicional a este existe un comando color para seleccionar un color de acuerdo a las combinaciones de un vector de 1 fila y 3 columnas con los valores de cada columna para R, G ,B.

```

316 angm = angm - 180 / pi;
317
318 ag = 0:pi/1000:pi; % Vector de valores para caluclar y graficar
319 %ag = 0:0.001:pi;
320 %potencia reactiva
321 Ppu1=Sa * cos(ag);
322 Qpu1 =Sa*sin(ag);
323 plot(Ppu1,Qpu1)
324 hold on
325
326 % recta P
327 plot([0,0],[0,Sa+0.5], '-k', 'LineWidth',1);
328
329 hold on
330 text(-0.1,Sa+0.5, 'P')
331
332 %potencia activa
333 plot([-Sa,Sa],[Sa*fdp,Sa*fdp]);
334
335 hold on
336 %factor de potencia
337 plot([0,Sa*sin(angp)], [0,Sa*fdp]);
338 %legend('Potencia Reactiva', ' ', 'Limite Mecánico', 'Potencia Activa')
339 hold on
340 text(0.025,0.2, '\phi')
341 plot(0.1*cos(fdp:pi/1000:pi/2),0.1*sin(fdp:pi/1000:pi/2));
342 hold on
343
344 %límite práctico permanente
345 plot(B*cos(ag)-A,B*sin(ag), 'g')
346 hold on
  
```

Figura 5.16. Generación de gráficas.

El estilo de línea y las demás modificaciones van seguidos en la misma línea de la función plot para dar valores en dos dimensiones seguido de una coma (,), en la que el aspecto se inserta ente apostrofes (‘), con los signos a utilizar como, por ejemplo: ‘--’, ‘:’, ‘.’, ‘*’, se puede asignar incluso letras, como se muestra en la Figura 5.17.

```

370 %reacta 0' a'
371 plot([-A,-A+B*cos(2*angm)],[0,B*sin(2*angm)]);
372 hold on
373 %prolongación de C
374 plot([-A+B*cos(2*angc),-A-B],[B*sin(2*angc),0])
375 hold on
376 plot(-A+0.19*cos(0:pi/1000:2*angc),0.19*sin(0:pi/1000:2*angc),'k');
377 hold on
378 text(-A+0.2,0.07,'Z\delta')
379 %reacta a a'
380 plot([-A-B,-A+B*cos(2*angm)],[0,B*sin(2*angm)])
381 hold on
382
383
384 %activo el otro recuadro para la gráfica
385 axes(handles.axes3)
386 cla
387
388 xtickformat('%g H')
389 x=linspace(0,24,0.1);
390 pVt2 = Vn
391 xIa = In
392 yIa = sin(acosd(fdp)*max(In))
393 Vdx = xIa*(Xd*Xq)
394 Vdy = yIa*(Xd*Xq)
395 axes(handles.axes3)
396 plot([0 pVt2],[0 0],'-V',[pVt2 pVt2+Vdx],[0 Vdy],'-V',[0 pVt2+Vdx],[0 Vdy],'-V')
397 axis([-pVt2+Vdx pVt2+Vdx -abs(Vdy) abs(Vdy)])
398 text(pVt2/2,0,'Vg')
399 text(pVt2,(Vdy)/2,'Zs*Ia')
400 text((pVt2+Vdx)/4,(Vdy)/3,'Fa')

```

Figura 5.17. Formato para diferenciar líneas y curvas mostradas.

Las funciones de Title, subtitle, subplot, axes, permiten asignar los títulos, subtítulos, más de una gráfica en la misma ventana rigiéndose a un orden determinado por una matriz de 3 filas por 3 columnas según sea el caso, axes es la función que hace referencia al objeto donde se grafican las funciones según la ecuaciones matemáticas de potencia activa, reactiva, corriente de campo, corriente de armadura determinadas en los anteriores capítulos, mostradas de igual forma en la misma de la Figura 5.15.

Si se da clic en el botón de Seleccionar, con anticipación se debe llenar el campo de texto con el número de puntos del valor final de E_{fmax} mediante el cual se determinará los valores de potencia activa, potencia reactiva, corriente y factor de potencia para la gráfica de curva de capacidad, como se indica en la Figura 5.14.; todas las gráficas se realizan con el comando plot, y hold para graficar más de una curva en la misma figura.

Se creó la interfaz gráfica de usuario utilizando diferentes componentes de la biblioteca de componentes y especificar el diseño y la disposición de la aplicación.

Para definir el comportamiento de la aplicación, GUIDE permite una versión integrada del editor de MATLAB. Todos los valores de los parámetros implementados y la dinámica observada en la herramienta de visualización se basan en los datos obtenidos en las pruebas en vacío y cortocircuito realizadas y representadas en la Figura 5.2. y la Figura 5.4. respectivamente, siguiendo las guías prácticas y modelamiento de las normas mencionadas.

La Figura 5.14. y la Figura 5.18., muestran el entorno GUIDE de la aplicación diseñada con el fin de visualizar la curva de capacidad del generador. La interfaz gráfica de usuario consta de tres ventanas y dos pestañas principales.

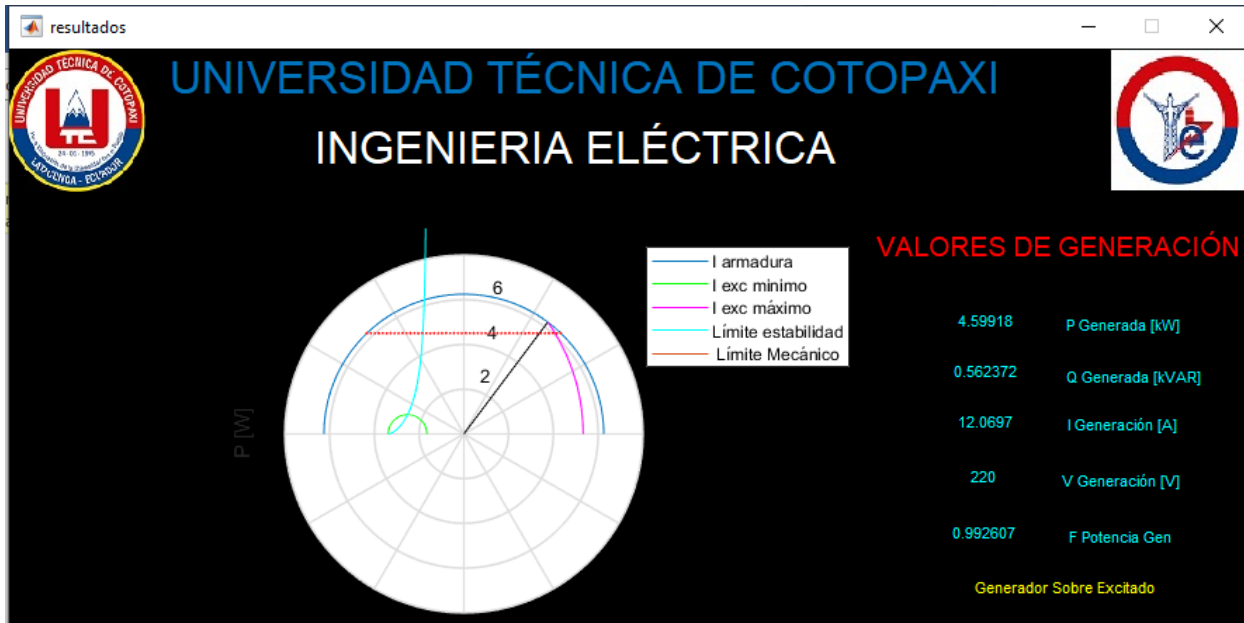


Figura 5.18. Límites en la curva de capacidad.

La pestaña Proceso muestra los valores del punto de funcionamiento (P y Q) junto con el factor de potencia y la curva de capacidad con el punto de funcionamiento. La pestaña Resultados (3) muestra el estado de funcionamiento, es decir, si el generador está funcionando en modo de sobreexcitación o en modo de sub-excitación con el modo de funcionamiento actual indicado. La pestaña Parámetros de la máquina, como se muestra en la Figura 5.14., indica las condiciones nominales del generador que pueden modificarse cambiando los valores de los campos respectivos. Las gráficas muestran la potencia activa y reactiva de la máquina síncrona, respectivamente. En la parte superior de la pestaña Parámetros se encuentra el verificador de límites.

El botón Dibujar se utiliza para activar o desactivar el trazado de la trayectoria del punto de funcionamiento.

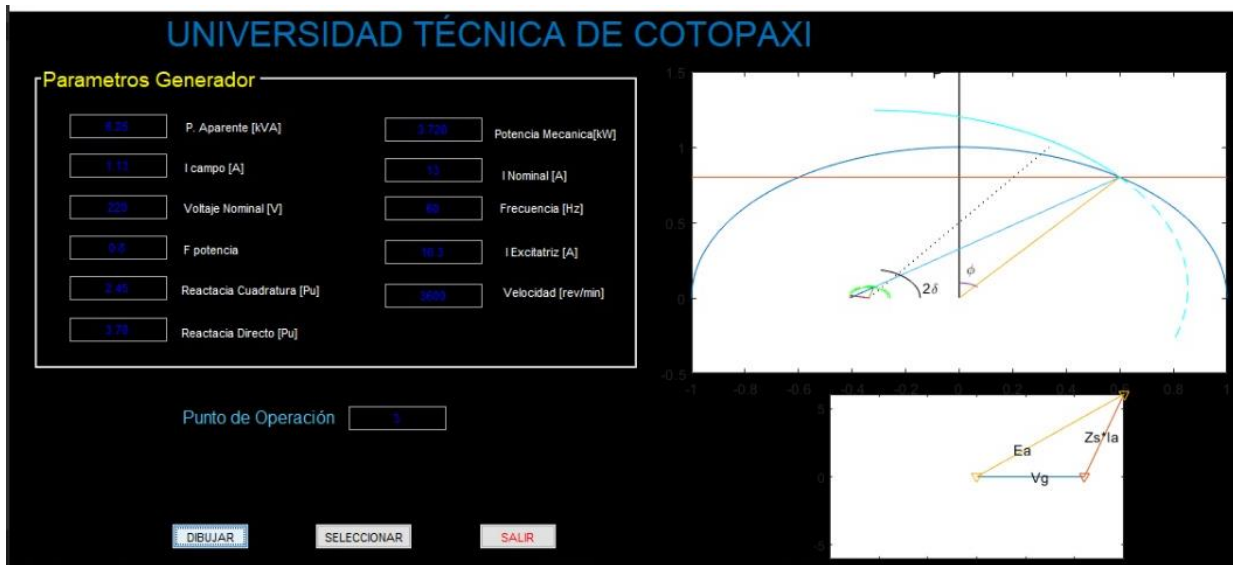


Figura 5.19. Diagrama fasorial resultante de Matlab

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Mediante la investigación realizada se pudo determinar que para el análisis de la curva de capacidad se basa en un diagrama fasorial de potencias activa y reactiva llamado comúnmente como diagrama circular de la máquina síncrona o límite térmico, esta curva permite determinar el valor al cual la máquina sus embobinados y núcleos alcanzan la temperatura de régimen de operación estable de acuerdo a sus aislamientos.

La curva de capacidad se obtuvo mediante los datos de placa y las pruebas de cortocircuito y circuito abierto del generador síncrono; con estas pruebas se determinó la reactancia de eje directo de 3.12 p.u y la reactancia en eje de cuadratura de 2.03 p.u y con estos valores de determinaron el voltaje interno de la máquina que es 4.62 p.u y el ángulo de 29.41° , potencia aparente y las respectivas potencias, el límite mínimo de corriente se obtuvo en la zona de operación subexcitada mediante los valores mínimos de la tensión interna de la máquina.

La aplicación desarrollada utilizando un entorno de software MATLAB con la ayuda de una interfaz gráfica que proporciona la interacción del usuario con la herramienta de visualización a través de pantallas gráficas, está diseñada para permitir el ingreso de los parámetros del generador que son: el factor de potencia, la potencia activa y reactiva, graficándonos los límites y su zona de

operación tomando en cuenta los cuadrantes que puede llegar a operar el generador ya que puede estar sobre-excitado o sub-excitado.

6.2. Recomendaciones

La obtención de estos parámetros en tiempo real facilita los posteriores análisis, por lo que se recomienda como adicional la construcción de un módulo de adquisición de datos para el monitoreo constante a través de una interfaz en la nube con la posibilidad de controlar la unidad por parte de los estudiantes y encargados de los laboratorios, con las debidas restricciones para cada tipo de usuario, ya que al contar con los límites de los parámetros de alimentación se puede restringir para garantizar el uso adecuado de la unidad.

La gravedad del efecto de sobre excitación depende del tipo de carga. El trabajo futuro se centrará en la implementación de características adicionales en la herramienta, como el límite de calentamiento de la región del estator, la dependencia de la temperatura de los límites del generador y la tensión terminal variable. Además, puede analizarse más a fondo el efecto de las características de la carga dinámica, que tiene una influencia significativa en la estabilidad de la tensión.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. E. G. S. D. E. C. S. A *et al.*, “Facultad de ciencias físicas y matemáticas diseño e implementación de software para la determinación dinámica de las curvas de operación,” 2020.
- [2] A. A. León, A. Bueno, and M. Aller, “Modelo dinámico de la máquina sincrónica de polos salientes en vectores espaciales y su aplicación al control directo de par,” *Ingeniería Energética*, vol. XXX, no. 2, pp. 26–35, 2009.
- [3] C. D. E. I. Eléctrica, I. José, and M. Aller, “Proyecto Técnico Investigativo : “ Estimación de Eficiencia en Máquinas de Autores : Fabián Ricardo Cevallos Aguirre Franco Oswaldo Pinos Vergara Tutor :,” 2019.
- [4] S. Bucaramanga, “Estabilidad en régimen permanente de sistemas eléctricos de potencia considerando límites de operación en generadores , transformadores y líneas de transmisión,” vol. 18, no. 2, pp. 141–149, 2021.
- [5] J. Grainger and W. Jr. Stevenson, “Análisis de Sistemas de Potencia,” *Cenace, Uanl*. p. 743, 1996.
- [6] M. Á. Rodríguez Pozueta, “Máquinas Eléctricas Síncronas,” p. 96, 2015.
- [7] C. D. E. I. Eléctrica, Ing, and X. Proaño, “Implementación de una unidad motor generador Ac-Ac, para realizar prácticas demostrativas de la puesta en paralelo entre dos unidades de generación Ac, en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi.”
- [8] I. Calero, “Protección De Generadores Eléctricos Mediante Relés Microprocesados Multifuncionales,” pp. 1–350, 2008.
- [9] T. D. E. Grado, P. A. La, and O. Del, “Implementación y montaje de un motor-generador Ac-Ac trifásico de 5 [kw], en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con la elaboración de un manual de operación, para realizar prácticas demostrativas.”
- [10] R. Miguel, “Máquinas Eléctricas II Miguel Ángel Rodríguez Pozueta,” 2018.

- [11] R. R. R. ; Santos and D. M. Navas, “Generadores Sincronos En Paralelo,” no. September, pp. 0–11, 2017.
- [12] D. Montoya, “Evaluación de la operación del generador síncrono basado en la formulación matemática de la curva de capacidad”.
- [13] K. Cubi and A. Pilatuña, “Rediseño e implementación del grupo motor dc- generador sincrónico para el laboratorio de sistemas eléctricos de potencia trabajo”.
- [14] Luz Quispe Mamani; Lisbeth Sanchez, ““Las curvas de capacidad de potencia y el análisis gráfico de los límites de operación del generador síncrono,”” *Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco*, p. 230, 2018.
- [15] I. J. Luis and R. Espinoza, “Manual De Operación Y Mantenimiento Eléctrico Del Generador Síncrono De Una Unidad De Generación De La Central Hidroeléctrica Paute Sopladora,” 2020.
- [16] L. Rivas, “Aspectos Constructivos Y Principio De Funcionamiento De La Máquina Síncrona Trifásica,” *Máquinas Eléctricas*, p. 50, 2008.
- [17] S. H. E. Efrain, “Generador Síncrono,” *Protecciones a sistemas de potencia*, vol. 1, p. 21, 2016.
- [18] E. Aimacaña and F. Torres, ““Diseño e implementación del control de un generador síncrono utilizando la técnica hardware in the loop,”” 2015.
- [19] V. Torres and W. Stalin, ““Diseño de un regulador de velocidad para un generador caterpillar en la cantera san joaquín 2 de la empresa mapeagre,”” 2019.
- [20] M. Rodríguez, “Máquinas Eléctricas II”.
- [21] F. De Ciencias, A. Calderón, S. Dámaris, V. Rebaza, and J. Carlos, ““Límites Operativos para el Manejo de la Energía Reactiva en Generadores Síncronos operando en Paralelo dentro un Sistema Aislado,”” *Lexus*, vol. 4, no. None, p. 37, 2007.
- [22] J. F. Gómez González, B. González Díaz, M. de la P. Fabiani Bendicho, and E. Pereda de Pablo, “Fundamentos de Ingeniería Eléctrica,” pp. 10–11, 2013.

- [23] S. A. Garces, “Software Para La Determinación De La Carta De Operación De Generadores Sincrónicos,” pp. 30–32, 2015.
- [24] M. Martínez, “Guía Para La Determinación De Límites De Operación,” vol. 32, no. 3, pp. 612–626, 2003.
- [25] J. Játiva, “Incorporación de Límites por Restricciones de Servicios Auxiliares en las Curvas de Capacidad de Generadores de Centrales Eléctricas,” *Revista Politécnica*, vol. 32, no. 1, pp. 33–42, 2013.
- [26] L. Irvin, “Determinación de Parámetros de la Máquina Síncrona,” no. 1131073.
- [27] S. Tirado, “Pruebas de circuito abierto y cortocircuito en los generadores sincrónicos”.
- [28] I. Eléctrica, L. Fernando, O. Tirano, J. David, and C. Bolívar, “Ciencia Unisalle TNA a partir de oscilogramas eléctricos,” 2020.
- [29] I. Standards, *IEEE Guide for Test Procedures Redline*, vol. 2019. 2009.
- [30] IEEE Standards, *IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses*, vol. 2002, no. November. 2003.
- [31] B. F. Montalvo Tapia, “Elaboración de una guía de prácticas de las librerías de MATLAB para aplicaciones en Ingeniería Eléctrica,” p. 99, 2019.

8. ANEXOS

ANEXO A: Modelos de la unidad motor generador

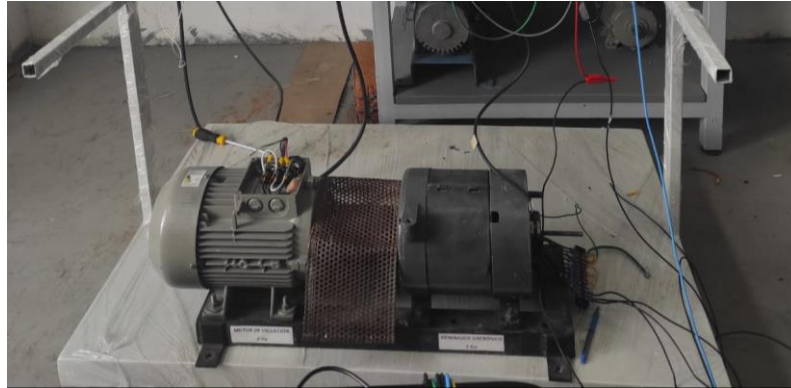


Figura A.1. Unidad motor generador AC-AC

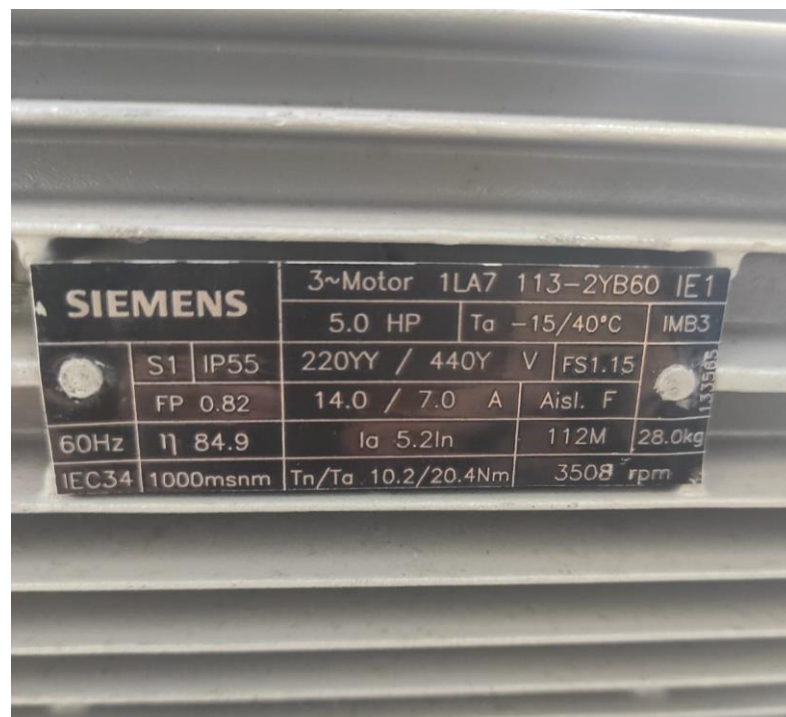


Figura A.2. Datos de placa de motor trifásico

ANEXO B: Conexión del generador para pruebas eléctricas



Figura B.1. Conexión estrella a la Unidad motor generador AC-AC



Figura B.2. Conexión interna del generador.

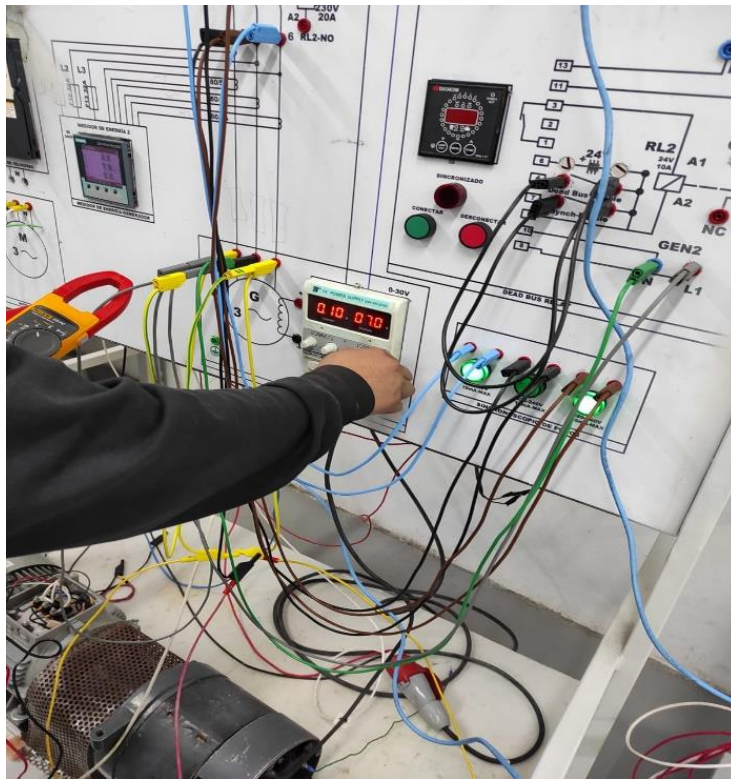


Figura B.3. Excitación de la fuente DC para Pruebas eléctricas del generador

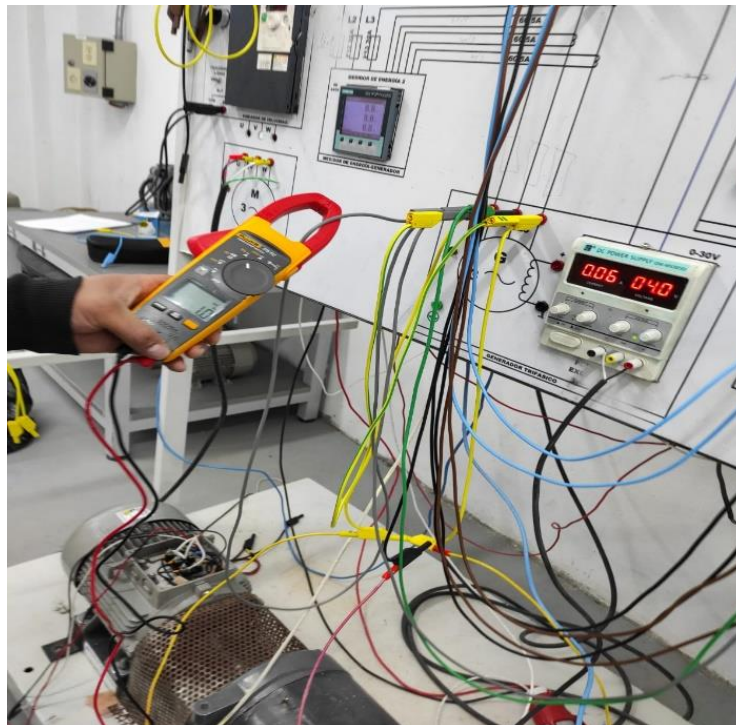


Figura B.4. Medición de la corriente de campo del generador



Figura B.5. Obtención de los voltajes con carga del generador.



Figura B.6. Valor de los r.p.m de la Unidad motor generador AC-AC.

ANEXO C: Sincronismo en paralelo de dos generadores

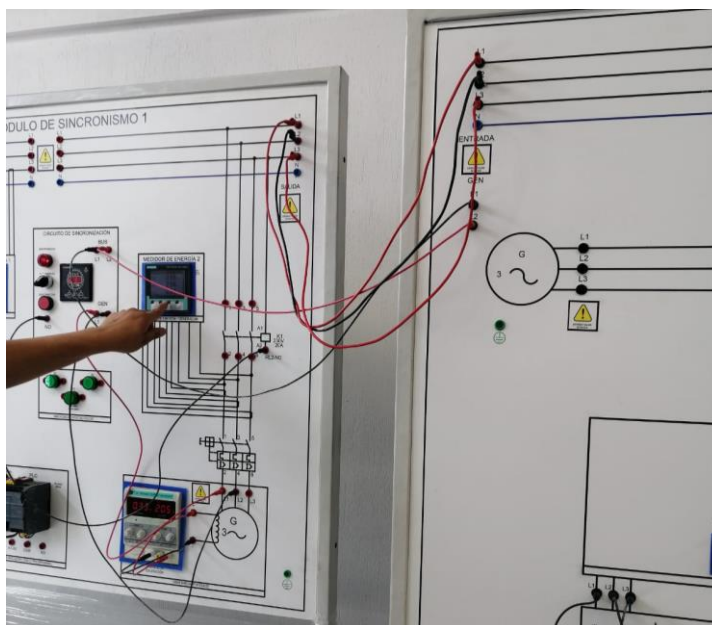


Figura C.1. Conexión entre el módulo de sincronismo 1 y el módulo de cargas

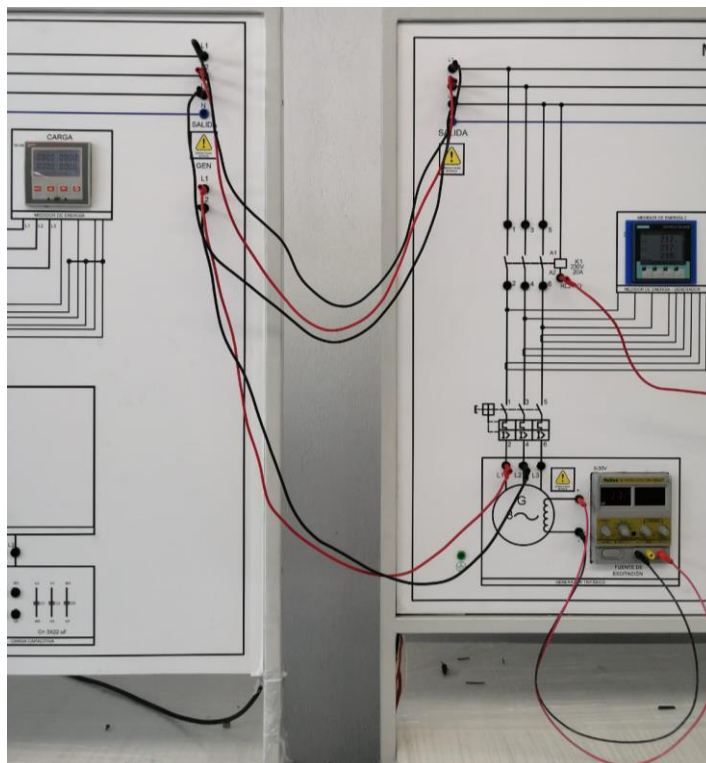


Figura C.2. Conexión entre el módulo de cargas y el módulo de sincronismo 2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA**

MÓDULO DE CARGAS

Manual de Usuario

ÍNDICE DE CONTENIDO

Hoja de equipos	79
Estructura metálica	81
Medidor de energía	82
Selector de 2 posiciones	83
Breaker trifásico	84
Porta fusibles	85
Transformadores de corriente	86
Carga resistiva	87
Carga inductiva.....	88
Carga capacitiva:	89
Puesta en marcha	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema Del Módulo De Cargas.....	79
Figura 2. Parte Posterior Del Módulo De Cargas.....	80
Figura 3. Estructura Metálica.....	81
Figura 4. Medidor De Energía.....	82
Figura 5. Selector De 2 Posiciones.....	83
Figura 6. Breaker Trifásico.....	84
Figura 7. Porta Fusibles.....	85
Figura 8. Transformadores De Corriente.....	86
Figura 9. Focos Incandescentes 200 W-220 V.....	87
Figura 10. Balastros De 250 W.....	88
Figura 11. Capacitores De 20 Uf.....	89
Figura 12. Enchufe Monofásico De 3 Patas.....	90
Figura 13. Breaker Trifásico De 63 A.....	90
Figura 14. Breaker Trifásico De 63 A.....	91
Figura 15. Posición Del Selector De Cargas.....	91
Figura 16. Posición Del Selector Principal.....	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Listado de elementos del módulo de cargas.	80
Tabla 2. Características principales del DMG 600.	82
Tabla 3. Características del interruptor de fuera tripolar.	84
Tabla 4. Características principales de los termo magnéticos.	84
Tabla 5. Características principales de los portafusiles de 32A.	85
Tabla 6. Características principales de los TC's.	86
Tabla 7. Características fundamentales de los focos incandescentes (resistencias).	87
Tabla 8. Características de los Balastos de sodio (Bobinas).	88
Tabla 9. Características de los capacitores NGM(Capacitores).	89

HOJA DE EQUIPOS

Institución	Universidad Técnica de Cotopaxi
Laboratorio	Máquinas Eléctricas
Laborarista	Carlos Maldonado

El módulo de cargas está constituido por diferentes elementos que son necesarios para su concreto funcionamiento.

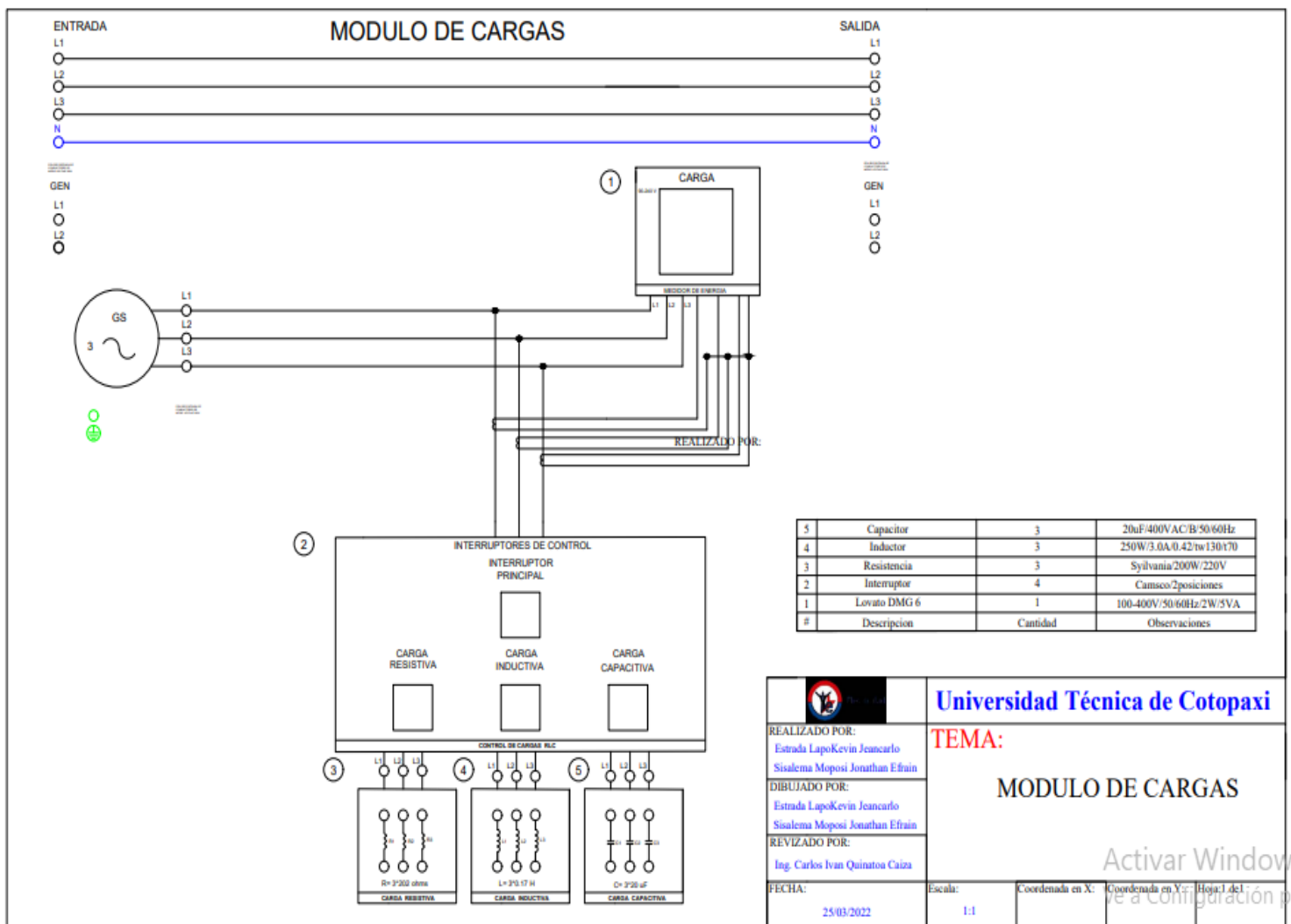


Figura 1. Esquema del Módulo de Cargas.

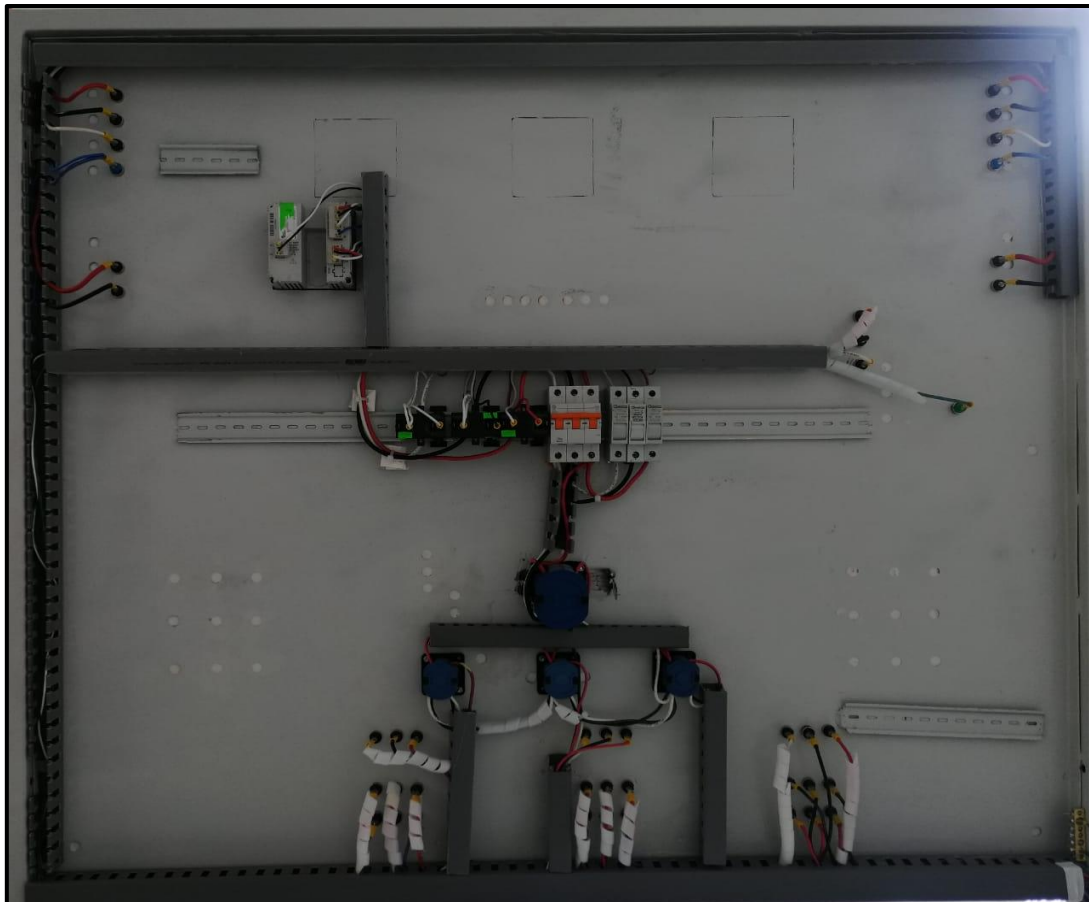


Figura 2. Parte posterior del Módulo de Cargas

A continuación, se describirá cada uno de los equipos incluyendo la parte posterior del módulo de cargas.

Tabla 1. Listado de elementos del módulo de cargas.

CÓDIGO	DETALLE	ESTADO
Sin Código	Estructura metálica color blanco hueso	Muy Bueno
60031804	Lovato DMG 600	Muy Bueno
CA099	Selector de dos posiciones, cantidad: 4	Muy Bueno
690997	Breaker trifásico C63	Muy Bueno
RT18 – 32	Porta fusible 32 A, cantidad: 3	Muy Bueno
Class: 0.5 CURRENT TRANSFORMER	Dixen, cantidad: 3	Muy Bueno
Sin Código	Focos incandescentes 200 W-220 V, cantidad: 3	Muy Bueno
Q250	Balastos de 250 W-220 V/AC, cantidad: 3	Muy Bueno
27ATK400200KANG	20 uF, 400 V/AC, 50-60 Hz, cantidad: 3	Muy Bueno

ESTRUCTURA METÁLICA: COLOR BLANCO HUESO



Figura 3. Estructura metálica

Características: Color blanco hueso

MEDIDOR DE ENERGÍA: LOVATO DMG 600



Figura 4. Medidor de energía

Tabla 2. Características principales del DMG 600.

ALIMENTACIÓN	
Tensión Nominal	100-400 V ~
Límites de funcionamiento	90-484 V ~
Frecuencia	45-66 Hz
Consumo/disipación de potencia	2W – 5 VA
Tiempo de inmunidad a micro-cortes	≥ 20 ms
Fusible recomendado	F1A (Rápido)
ENTRADA VOLTIMÉTRICA	
Tensión nominal Ue máx.	600 V CA L-L (346 V CA L-N)
Rango de medida	50 a 720 V L-L (415 V CA L-N)
Gama de frecuencias	45 a 65 Hz
Tipo de medida	Verdadero valor eficaz (TRMS)
Impedancia de entrada de medida	L-N - L-L > 8M
Modo de conexión	Línea monofásica, bifásica, trifásica con o sin neutro y sistema trifásico equilibrado
Fusibles recomendados	F1A (rápido)
ENTRADAS AMPERIMÉTRICAS	
Corriente nominal Ie	1 A ~o 5 A ~

Rango de medida	Escala 5 A: 0,025 - 6 A~ Escala 1 A: 0,025 - 1,2 A~
Tipo de entrada	Shunt alimentado mediante transformador de corriente externo (baja tensión) de 5 A máx.
Tipo de medida	Verdadero valor eficaz (TRMS)
Intensidad límite térmica permanente	+20% Ie
Intensidad límite térmica de corta duración	50 A durante 1 segundo
Consumo (por fase)	≤0,6 VA
PRECISIÓN DE MEDIDA	
Condiciones de medida	+23°C ±2°C
Tensión (fase - neutro)	± 0,5% (50 a 480 V~) ±0,5 dígitos
Tensión (fase - fase)	± 0,5% (80 a 830 V~) ±0,5 dígitos
Corriente (TC /5)	± 0,5% (0,1 a 1,2 In) ±0,5 dígitos
Energía activa	Clase 1 (IEC/EN 62053-21)
Energía reactiva	Clase 2 (IEC/EN 62053-23)
CARCASA	
Tipo	Empotrable
Material	Policarbonato
Grado de protección frontal	IP54 frontal –IP 20 terminales
Peso	300g

SELECTOR DE 2 POSICIONES: INTERRUPTOR DE FUERZA TRIPOLARES (CAMSCO)



Figura 5. Selector de 2 posiciones

Tabla 3. Características del interruptor de fuera tripolar.

ALIMENTACIÓN	
20 A	300 VAC
CARACTERÍSTICAS	MEDIDA MARCO
Interruptor 3P-16 A	48x48 mm
Interruptor 3P-32 A	64x64 mm
Interruptor 3P-63A	64x64mm
TIPOS	
Interruptores de fuerza tripolares	
Tipo Leva	
Caratula: ON-OFF	

BREAKER TRIFÁSICO: GENERAL ELECTRIC



Figura 6. Breaker trifásico.

Tabla 4. Características principales de los termo magnéticos.

TIPO DE PROTECCIÓN	
BKN 3P C6 Mini Interruptor LS, Termomagnético, Riel, 6Amp, 3 Polos, 440 Vac	
CARACTERÍSTICAS	
Protección	Sobrecarga y cortocircuito
Corriente nominal	6 A

Numero de polos	3P
Poder de corte	1 polo 1A ~ 63A 6kA a 230 / 400VAC
Estándar	IEC 60898
Aprobación	CCC, SABS, SEMKO CB
Tipo de disparo	Termo-magnético
Durabilidad eléctrica	6000 operaciones
Montaje	Montaje en riel DIN de 35mm
Ancho	17,8 mm por polo
Terminales	Tipo túnel (Cable hasta 25mm ²) Tipo dual (Túnel & Bornes)

PORTA FUSIBLES: CAMSCO



Figura 7. Porta fusibles

Tabla 5. Características principales de los portafusiles de 32A.

BASES CAMSCO PARA FUSIBLES CILÍNDRICOS 10X38 MM	
CARACTERÍSTICAS	
BASES CAMSCO	FUSIBLE CILÍNDRICO CAMSCO
Bases CAMSCO para Fusibles Cilíndricos. 10X38 mm	Fusible Cilíndrico CAMSCO.
1 Polo	Rápido (aR).

32 AMP	500 V.
500 V	10×38 mm.

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE: DIXSEN



Figura 8. Transformadores de Corriente

Tabla 6. Características principales de los TC's.

PARÁMETROS DE LOS TC's	
Corriente del primario	100 A
Corriente del secundario	5 A
Frecuencia	50/60 Hz
Clase	0.5
CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO	
Frecuencia de funcionamiento	40~60 Hz
Resistencia sobrecargas	1,2 In
Corriente dinámica	2,5 Ith en 1 seg
Grado de protección	IP 30
Humedad relativa, sin condensación	90%
Aislamiento (Tipo seco)	Clase E
Temperatura de empleo	-25....+ 50 °C
Temperatura de almacenaje	-40....+ 80 °C

CARGA RESISTIVA: FOCOS INCANDESCENTES



Figura 9. Focos incandescentes 200 W-220 V

Tabla 7. Características fundamentales de los focos incandescentes (resistencias).

CARACTERÍSTICAS ESPECIALES	
Tipo ligero	Incandescente
Potencia	200 vatios
Color claro	Soft White
Marca	GE Lighting
Cumple con la legislación de iluminación de 2012 Tema de energía: lámpara incandescente tecnología del foco: incandescente máx. longitud total del foco: 5 – 3/8" foco base tipo: Medio tornillo (E26) foco temperatura de color: 2800 K, luz foco mm. Diámetro: 2 – 5/8" principal aplicación: uso general Duración: 750 HR. la suciedad: no W Voltaje: 200: 120 Rough Service: no	
ESPECIFICACIONES	
Código UNSPSC	39101612
Forma del artículo	a21
Nombre de la marca	GE Lighting
Número de inventario nacional	6240-00-222-8169
Número de pieza	200A/W
Peso del producto	1.00 libras
Voltaje	120 vatios
Voltaje	200.0 vatios

CARGA INDUCTIVA: BALASTROS PARA LÁMPARAS DE SODIO



Figura 10. Balastos de 250 W

Tabla 8. Características de los Balastos de sodio (Bobinas).

CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES	
Altura sobre el nivel del mar	2 640 m
Ambiente	Tropical
Humedad	Mayor al 90 %
Temperatura máxima y mínima	45 °C y - 5 °C respectivamente.
Temperatura promedio	14 °C.
Instalación	A la intemperie
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	
Tensión Nominal del sistema	
Línea - Línea	208, 240 V
Línea - Neutro	220, 277 V
Frecuencia del sistema	60 Hz

CARGA CAPACITIVA: CAPACITORES NGM MOTOR RUN



Figura 11. Capacitores de 20 uF

Tabla 9. Características de los capacitores NGM(Capacitores).

JCM Motor Run Capacitor 20uf MFD 250 V/450 V AC Volts Cilindro redondo 4 pines CBB60	
CARACTERÍSTICAS	
Función	condensador para motor CBB60.
Capacidad	20 uF MFD 450 VAC (funciona para 220 V, 250 V, 300 V, 350 V, 400 V, hasta 450 V) AC.
Frecuencia	50/60 Hz.
Forma	cilindro redondo, 4 pines.
APLICACIONES	
para ejecutar motores eléctricos en aire acondicionado, horno, calentador, lavadora, soplador, bomba, etc.	
ESPECIFICACIONES	
Color	Blanco
Código UNSPSC	32121500
Ean	0738771099038
Estilo	20 UF X 450VAC

Número de modelo	25-ACBB60A20UF
Número de pieza	25-ACBB60A20UF
Tamaño	20 UF X 450VAC

PUESTA EN MARCHA

Paso 1: Conectar el enchufe monofásico ubicado en la parte posterior del módulo a la fuente de suministro eléctrico.

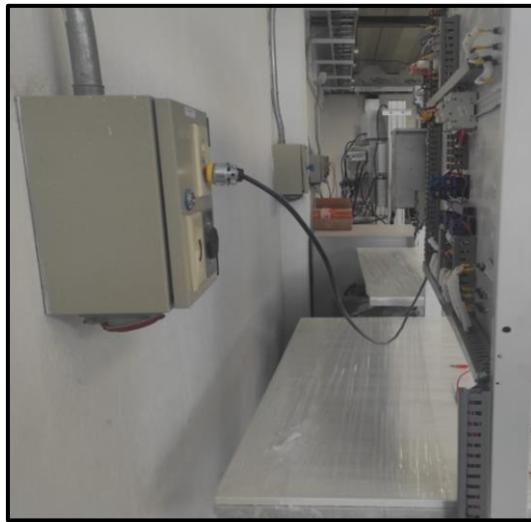


Figura 12. Enchufe monofásico de 3 patas

Paso 2: Colocar en la posición ON el breaker trifásico de 63 A.

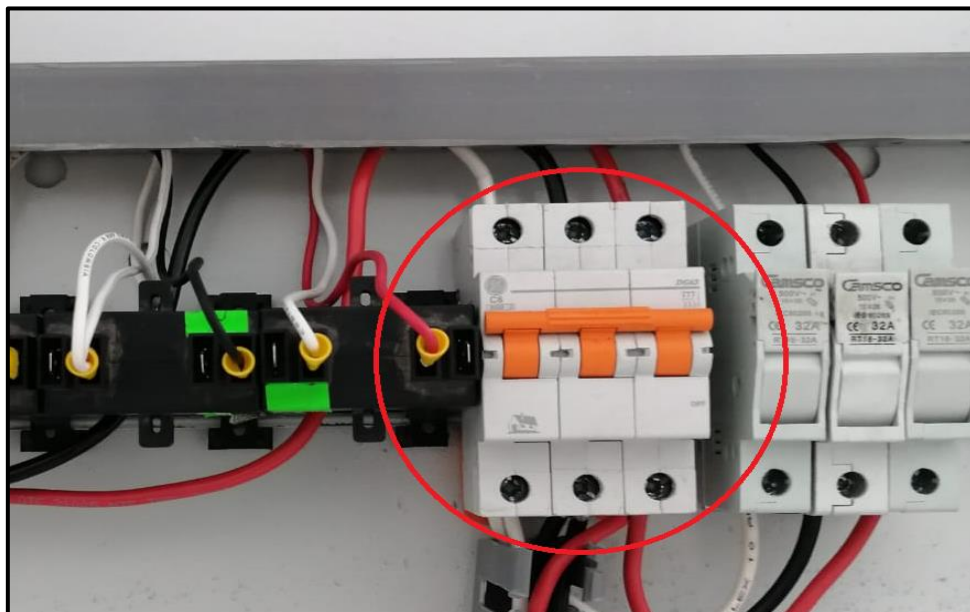


Figura 13. Breaker trifásico de 63 A

Paso 3: Energizar las líneas del generador del módulo de cargas desde las salidas del generador del módulo 1

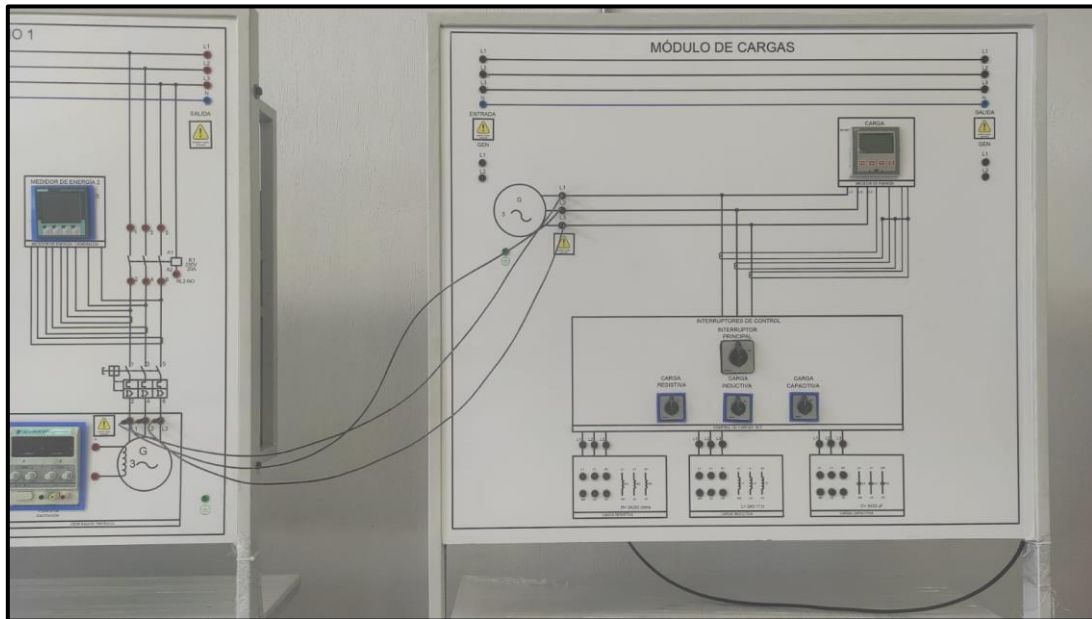


Figura 14. Breaker trifásico de 63 A

Paso 4: Realizar las diversas conexiones (estrella o delta) dependiendo de la guía práctica a realizarse en el módulo, es necesario asegurarse que las conexiones estén en la posición adecuada y que sean las correctas.

Paso 5: Accionar las cargas mediante el control de cargas RLC, girar el selector de dos posiciones de cualquiera de las cargas o las tres al mismo tiempo



Figura 15. Posición del selector de cargas

Paso 6: Se debe pasar a la posición ON el selector principal para accionar la carga seleccionada.



Figura 16. Posición del selector principal

Observación: Para desenergizar el módulo después de haber acabado con la práctica se realizarán los pasos anteriores de manera viceversa.

**LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

ELABORADO POR: Docente	REVISADO POR: Laboratorista	APROBADO POR: Director de carrera
Fecha:	Fecha:	Fecha:
Firma:	Firma:	Firma:

CARRERA	CÓDIGO DE LA ASIGNATURA	NOMBRE DE LA ASIGNATURA
INGENIERIA ELÉCTRICA	IELM 306	Máquinas Eléctricas

PRÁCTICA N°	LABORATORIO:	Máquinas Eléctricas	DURACIÓN (HORAS)
01	NOMBRE DE LA PRÁCTICA:	Pruebas en el generador síncrono del circuito abierto y cortocircuito para la obtención de datos del generador.	2

1	OBJETIVO
	Realizar las pruebas de circuito abierto(vacío) y cortocircuito de una unidad motor generador Ac-Ac.

2	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA
	<p>2.1. INTRODUCCIÓN</p> <p>La presente práctica detalla las pruebas en vacío y cortocircuito de una maquina síncrona, ya que son 2 de las 3 necesarias que permiten obtener los parámetros de un generador, con la finalidad de que el operador lo pueda manipular correctamente para que el funcionamiento de la maquina sea optimo.</p> <p>En esta práctica se mostrarán los resultados obtenidos de la prueba en vacío de un generador síncrono.</p> <p>2.2. LISTA DE RECURSOS</p> <ul style="list-style-type: none"> - Botas dieléctricas - Casco de seguridad - Guantes dieléctricos - Protección visual

- Mandil

2.3. ADVERTENCIAS

- Lea y comprenda el manual de seguridad y operación de la maquina y ensayos universales
- No usar teléfono celular al momento de manipular los equipos
- No tocar los equipos cuando estén en pleno funcionamiento

2.4. INSTRUCCIONES:

- Comprobar que los equipos estén desconectados antes de empezar la prueba
- Conectar correctamente las salidas de la máquina para obtener resultados correctos
- Respetar las señalizaciones existentes en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas

2.5. EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y MATERIALES NECESARIOS

Equipos:

- Módulo de sincronismo 1
- Generador trifásico de 5 kW
- Fuente DC 0-30V/0-2^a
- Pinza Amperimetrica.

Instrumentos:

- Pinza amperimétrica
- Cables de seguridad
- Medidor de energía (Sentron Pac)

2.6. MEDIDAS DE SEGURIDAD

Los estudiantes y docentes deben asistir a la charla de inducción de seguridad en la primera práctica por una sola vez, la misma que será facilitada por el laboratorista y deberán firmar un registro de inducción.

- EPP's

2.7. INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD

- Utilizar los equipos de protección personal para evitar accidentes
- Lea y comprenda la presente guía de laboratorio
- Lea y comprenda el manual de seguridad y operación de la máquina de ensayos universales
- No corra dentro del laboratorio
- Absténgase de usar el teléfono celular
- Tomar precaución de la señalética

2.8. ACTIVIDADES A DESARROLLAR

2.8.1 Prueba de circuito abierto

La prueba de circuito abierto se lo realiza al trabajar el generador sin carga, haciéndola girar mediante una maquina externa a su velocidad nominal y corriente de campo igual a cero. Al incrementar de manera progresiva la corriente de campo inyectando una tensión DC y por supuesto su excitatriz esta tiende a obtener valores de voltaje en los bornes del generador ya que la corriente que circula por la armadura es cero debido a que el generador se encuentra en vacío, gracias a esto se puede obtener La curva característica en vacío, estos parámetros permiten determinar la tensión interna que se genera por una corriente de campo. (1)

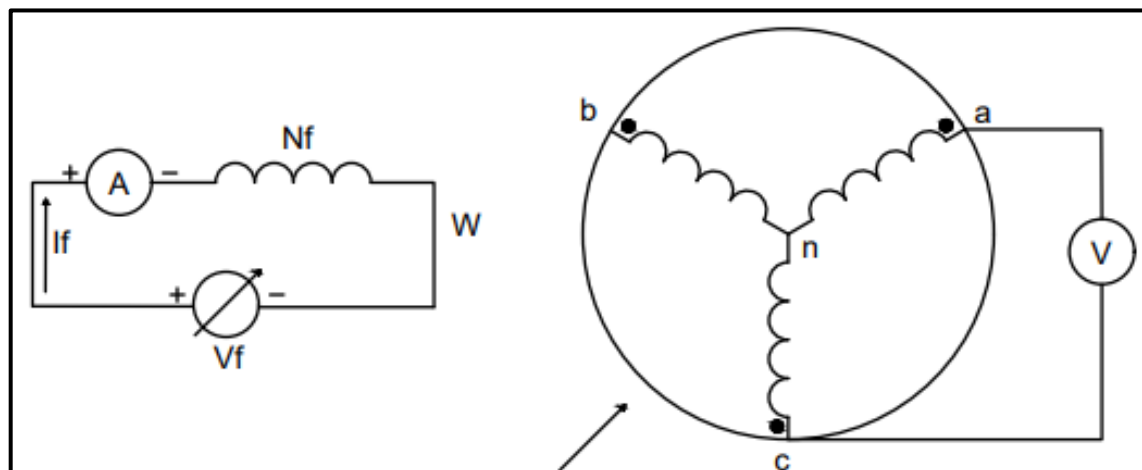


Figura 1. Diagrama de prueba de circuito abierto

2.8.1.1 Metodología y Técnica Experimental

1. Verificar que todo el módulo de sincronismo 1 se encuentre desconectado

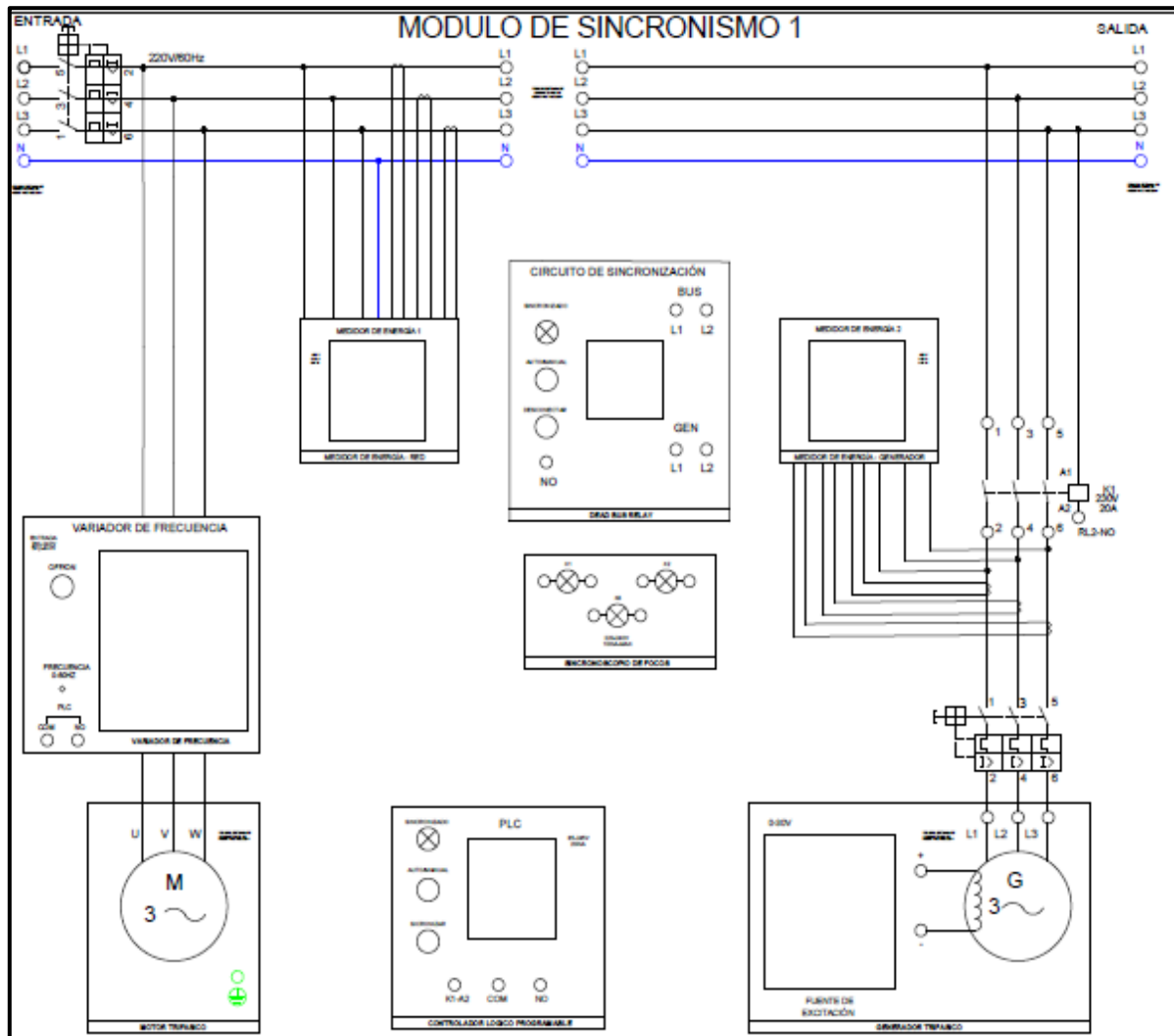


Figura 2. Módulo de sincronismo 1 desconectado

2. Seguir el esquema de conexiones mostrado a continuación para la medición de tensiones y corrientes

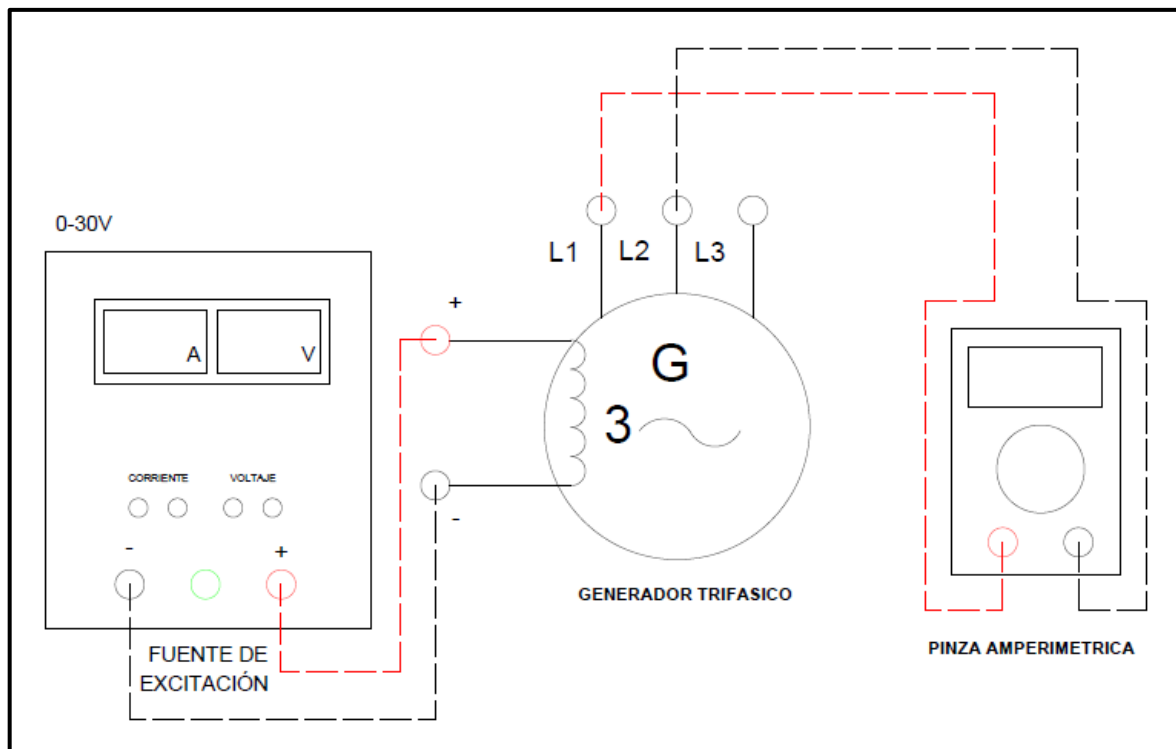


Figura 2. Diagrama de conexión prueba de circuito abierto

3. Conectar al suministro eléctrico el módulo de sincronismo 1 a su respectivo tomacorriente



Figura 3. Conexión del módulo al suministro eléctrico

4. Accionar el braker principal del módulo de sincronismo 1 ubicado en la parte posterior del módulo

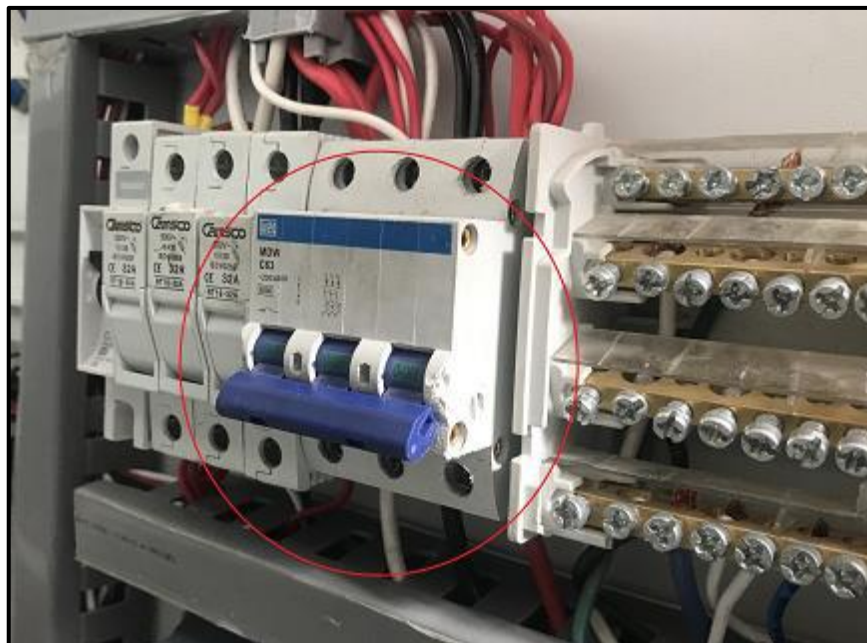


Figura 4. Braker principal del módulo de sincronismo 1

5. Encender la fuente de excitación (verificar que se encuentre con 0 V)



Figura 5. Fuente de excitación

6. Encender el generador síncrono mediante el selector que se encuentra al costado izquierdo del variador de frecuencia (verificar que el potenciómetro del variador de frecuencia se encuentre en 0)



Figura 6. Selector del variador de frecuencia

7. Con un tacómetro llevar al generador a una velocidad síncrona (3600 RPM) se debe ir regulando con el potenciómetro del variador de frecuencia



Figura 7. Tacómetro digital

8. Aumentar de manera progresiva la corriente de campo y medir la tensión en los bornes del generador. Debido a que no existe corriente en la armadura, la tensión en los bornes de medida es la tensión inducida.



Figura 8. Fuente de excitación

9. Registrar los valores obtenidos en el cuadro de resultados ubicado al final de la guía práctica

2.8.2 Prueba de cortocircuito

Esta prueba se la realiza al cortocircuitar los terminales de la máquina, consiste en establecer la corriente de campo a cero, para después de esto subir gradualmente la corriente de campo.

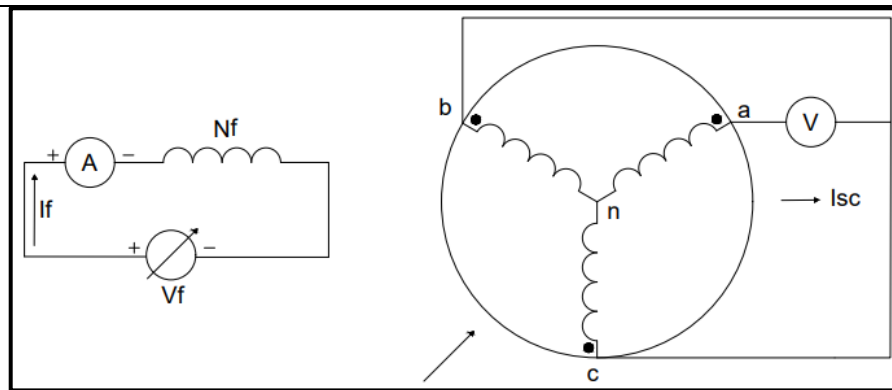


Figura 9. Diagrama de prueba de cortocircuito. Fuente propia

2.8.2.1 Metodología y Técnica Experimental

1. Verificar que todo el módulo se encuentre desconectado
2. Seguir el esquema de conexiones mostrado a continuación

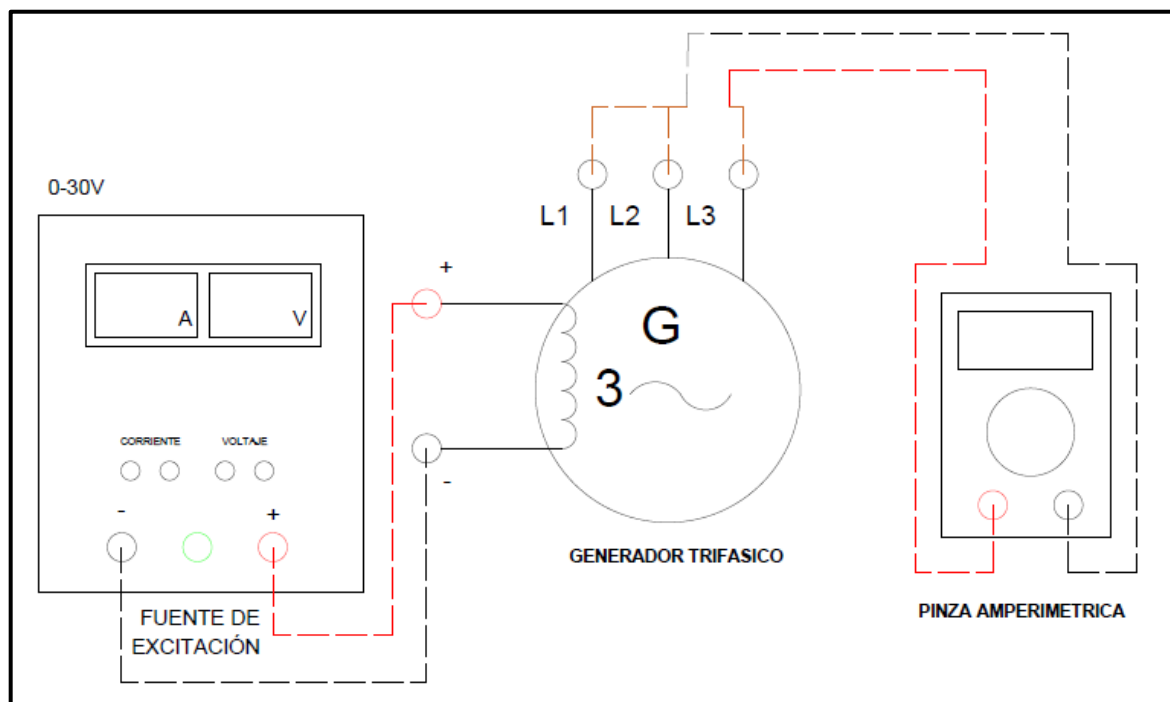


Figura 10. Diagrama de conexión prueba de cortocircuito.

3. Conectar al suministro eléctrico el módulo de sincronismo 1 a su respectivo tomacorriente
4. Accionar el breaker principal del módulo de sincronismo 1 ubicado en la parte posterior del módulo
5. Encender la fuente de excitación (verificar que se encuentre con 0 V)
6. Encender el generador síncrono mediante el selector que se encuentra al costado izquierdo del variador de frecuencia (verificar que el potenciómetro del variador de frecuencia se encuentre en 0)

7. Con un tacómetro llevar al generador a una velocidad síncrona (3600 RPM) se debe ir regulando con el potenciómetro del variador de frecuencia
8. Aumentar de manera progresiva la corriente de campo y medir la tensión en los bornes del generador. Debido a que no existe corriente en la armadura, la tensión en los bornes de medida es la tensión inducida.
9. Registrar los valores obtenidos en el cuadro de resultados ubicado al final de la guía práctica.
10. Con los resultados obtenidos en el punto 9 realizar el gráfico correspondiente a las pruebas realizadas en la Tabla 1.1 y 1.2.
11. Obtención del valor del eje directo utilizando la siguiente ecuación en por unidad.

$$X_d = \frac{V_a}{I_{a_{cc}}}$$

12. Obtención del valor del eje de cuadratura utilizando la siguiente ecuación en por unidad.

$$X_q = \frac{(\cos 2\delta - 1)X_d}{(1 + \cos 2\delta)V - \frac{2E}{V} \cos \delta}$$

13. Datos característicos del generador síncrono en: base, reales y por unidad mediante la siguiente ecuación.

$$V_{reales} = (V_{p.u} * V_{base})$$

14. Con los datos obtenidos en el punto 13 llenar la Tabla 1.3
15. Obtener los valores característicos de la placa del generador en la Tabla 1.4., para la simulación utilizando Matlab con su librería GUIDE.
16. Análisis de la curva de capacidad del generador síncrono mediante la operación en varios puntos con la obtención de datos del punto 15.

2.9 BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

1. **Laura Tulcán, Leonel Calderon.** *PRUEBA DE VACÍO Y CORTOCIRCUITO DE LA MÁQUINA SÍNCRONA*. Santander, Colombia : UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 5 de Noviembre del 2014.

Características del generador síncrono en por unidad base y reales.

Tabla 1.3 Características del generador síncrono

Datos			
PARAMETROS	BASE	REALES	POR UNIDAD [p.u.]
Voltaje en vacío [V]			
Corriente [A]			
Voltaje N [V]			
X_d [Ω]			
X_q [Ω]			
R_a [Ω]			

Características de la placa del generador síncrono.

Tabla 1.4 Datos característicos.

Parametro	Magnitud	Unidad
Potencia Aparente		
Potencia Activa		
Potencia Reactiva		
Factor de potencia		
Frecuencia		
Velocidad		
Voltajes		
Corriente de campo		
Corriente de armadura		
Reactancia en eje Directo X_d		
Reactancia en eje cuadratura X_q		

Parte principal de simulación.



proceso

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

Parametros Generador

<input type="text"/>	P. Aparente [KVA]	<input type="text"/>	Potencia Mecanica [KW]
<input type="text"/>	I campo [A]	<input type="text"/>	I Nominal [A]
<input type="text"/>	Voltaje Nominal [V]	<input type="text"/>	Frecuencia [Hz]
<input type="text"/>	F potencia	<input type="text"/>	I Excitatriz [A]
<input type="text"/>	Reactacia Cuadratura [Pu]	<input type="text"/>	Velocidad [rev/min]
<input type="text"/>	Reactacia Directo [Pu]		

Punto de Operación

DIBUJAR SELECCIONAR SALIR

LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ELABORADO POR: Docente	REVISADO POR: Laboratorista	APROBADO POR: Director de carrera
Fecha:	Fecha:	Fecha:
Firma:	Firma:	Firma:

CARRERA	CÓDIGO DE LA ASIGNATURA	NOMBRE DE LA ASIGNATURA
INGENIERIA ELÉCTRICA	IELM 306	Máquinas Eléctricas

PRÁCTICA N°	LABORATORIO:	Máquinas Eléctricas	DURACIÓN (HORAS)
01	NOMBRE DE LA PRÁCTICA:	Elementos que intervienen en el módulo de cargas	2

1	OBJETIVO
	Realizar el Sincronismo de dos Generadores en paralelo de forma manual

2	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA
	<p>2.1. INTRODUCCIÓN</p> <p>La presente práctica detalla el procedimiento que se debe tener para el sincronismo de dos generadores síncronos en paralelo, ya que son utilizados como autoabastecimiento y confiabilidad de los sistemas de energía eléctrica. Teniendo dos sistemas de alimentación permite reducir los cortes del suministro eléctrico que en la parte industrial es crítico porque conlleva a pérdidas de producción, las ventajas que se tienen al trabajar con dos generadores en paralelo es la disponibilidad debido a que son indispensables para suplir las necesidades de potencia debido al incremento de cargas, esto con disponibilidad de mayor generación que cuando se dispone de un solo generador.</p> <p>2.2. LISTA DE RECURSOS</p> <ul style="list-style-type: none"> - Botas dieléctricas - Casco de seguridad - Guantes dieléctricos

- Protección visual
- Mandil

2.3. ADVERTENCIAS

- Lea y comprenda el manual de seguridad y operación de la maquina y ensayos universales
- No usar teléfono celular al momento de manipular los equipos
- No tocar los equipos cuando estén en pleno funcionamiento

2.4. INSTRUCCIONES:

- Conectar correctamente la alimentación de los módulos
- Comprobar que los equipos estén desconectados antes de empezar la prueba
- Respetar las señalizaciones existentes en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas

2.5. EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y MATERIALES NECESARIOS

Equipos:

- Módulo de sincronismo 1
- Módulo de sincronismo 2
- Módulo de cargas

Instrumentos:

- Guía práctica 2
- Pinza amperimétrica
- Cables de seguridad
- Voltímetro

2.6. MEDIDAS DE SEGURIDAD

Los estudiantes y docentes deben asistir a la charla de inducción de seguridad en la primera práctica por una sola vez, la misma que será facilitada por el laboratorista y deberán firmar un registro de inducción.

- EPP's

2.7. INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD

- Utilizar los equipos de protección personal para evitar accidentes
- Lea y comprenda la presente guía de laboratorio
- Lea y comprenda el manual de seguridad y operación de la máquina de ensayos universales
- No corra dentro del laboratorio
- Absténgase de usar el teléfono celular
- Tomar precaución de la señalética

2.8. ACTIVIDADES A DESARROLLAR

1. Identificar que el módulo 1 este sin ningún tipo de conexión y fuera de sincronismo.

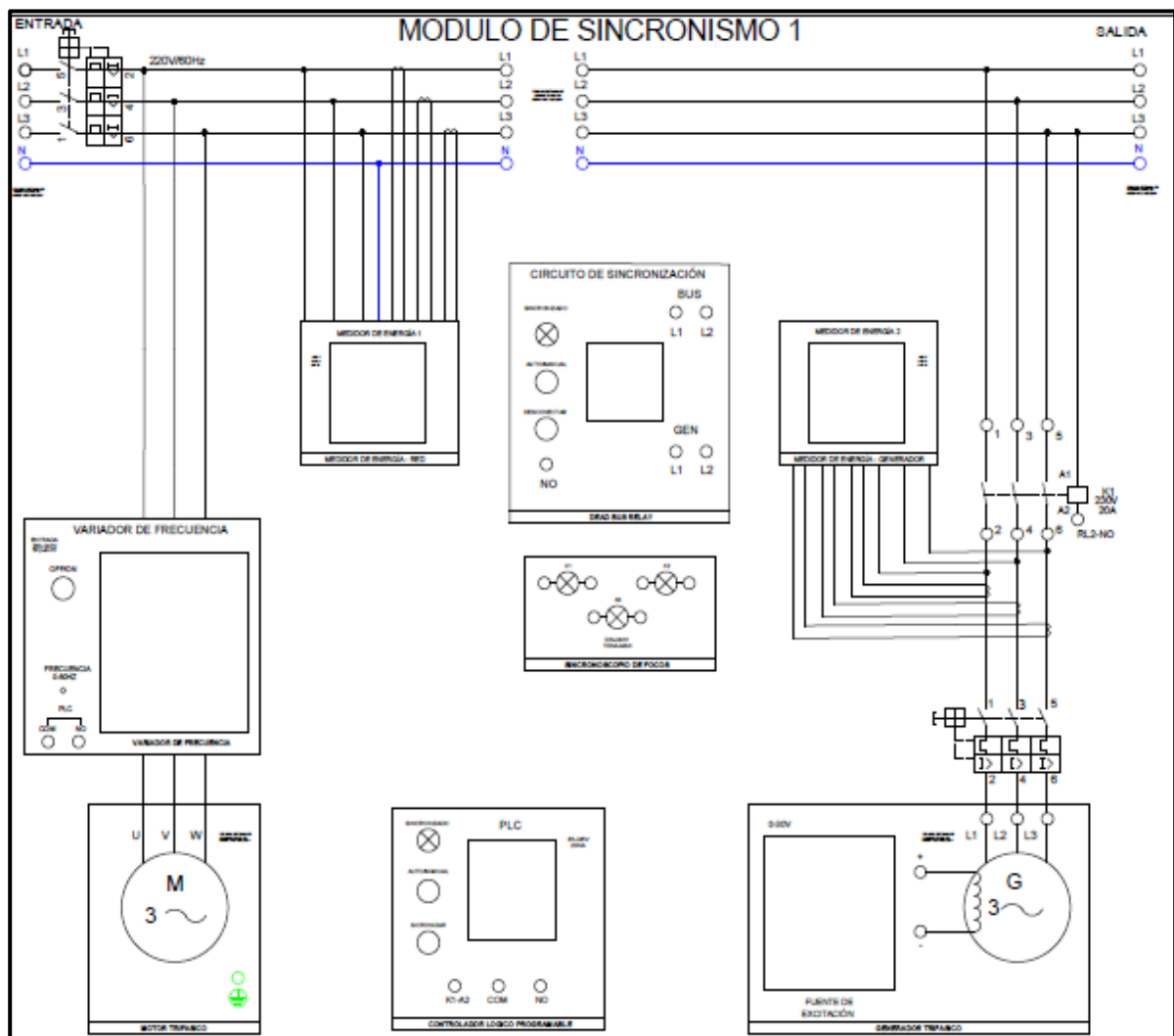


Figura 1. Módulo de sincronismo 1

Bajo las características de la figura 1 identificar:

- Medidores digitales
- Variador de frecuencia
- PLC
- Fuente de excitación
- Circuito de sincronización
- Motor
- Generador
- Bornes de entrada y salida
- Bornes de salida del generador
- Bornes para conexiones de luces piloto
- Bornes de puesta a tierra
- Potenciómetro del variador de frecuencia
- Selectores del PLC
- Selector del circuito de sincronización
- Pulsador de paro del circuito de sincronización

2. Identificar que el módulo de cargas este sin ningún tipo de conexión

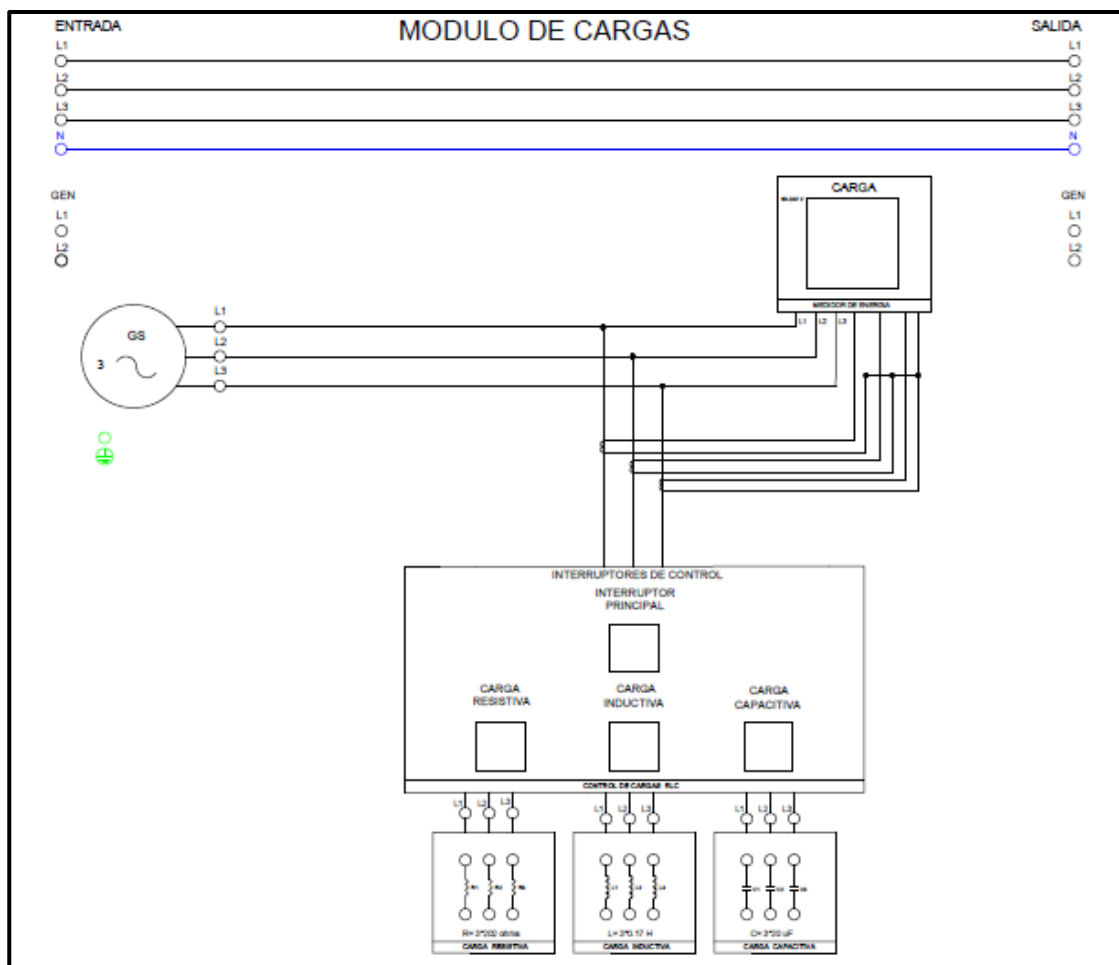


Figura 2. Módulo de cargas

Bajo las características de la figura 2 identificar:

- Medidor digital
- Interruptor principal
- Interruptor de cargas resistivas
- Interruptor de cargas inductivas
- Interruptor de cargas capacitivas
- Bornes de entrada y salida
- Bornes de salida del generador
- Bornes para conexiones en Y o Δ

3. Identificar que el módulo de cargas este sin ningún tipo de conexión

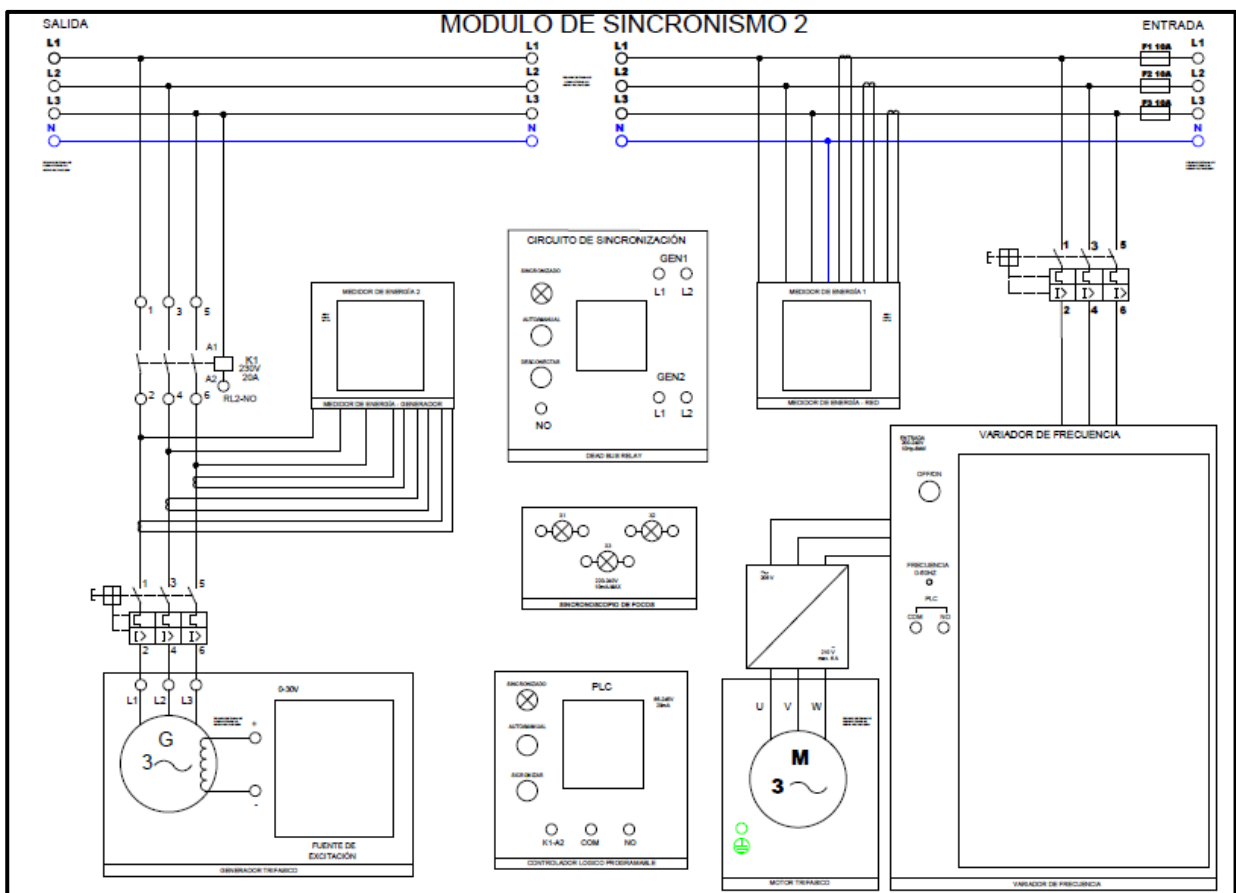


Figura 3. Módulo de sincronismo 2

Bajo las características de la figura 3 identificar:

- Medidores digitales
- Variador de frecuencia
- PLC
- Fuente de excitación
- Circuito de sincronización
- Motor
- Generador
- Bornes de entrada y salida

- Bornes de salida del generador
 - Bornes para conexiones de luces piloto
 - Bornes de puesta a tierra
 - Potenciómetro del variador de frecuencia
 - Selectores del PLC
 - Selector del circuito de sincronización
 - Pulsador de paro del circuito de sincronización
4. En el módulo 1 realizar un puente entre el plub COM con el plub NO con cable banana en el variador de frecuencia como se muestra a continuación

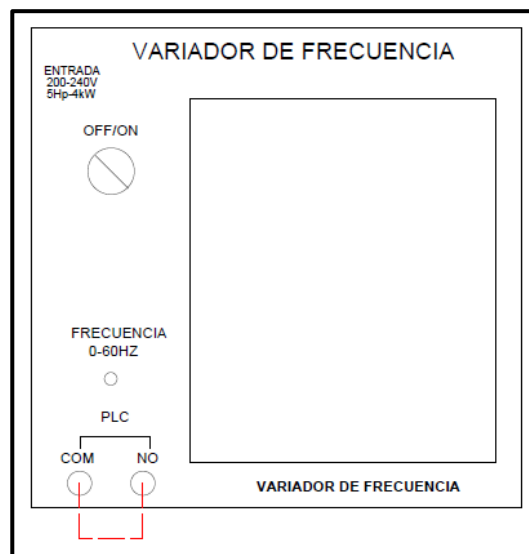


Figura 4. Conexione entre plub COM y plub NO

5. Conexión entre la fuente de excitación y las entradas positiva y negativa del generador del módulo 1

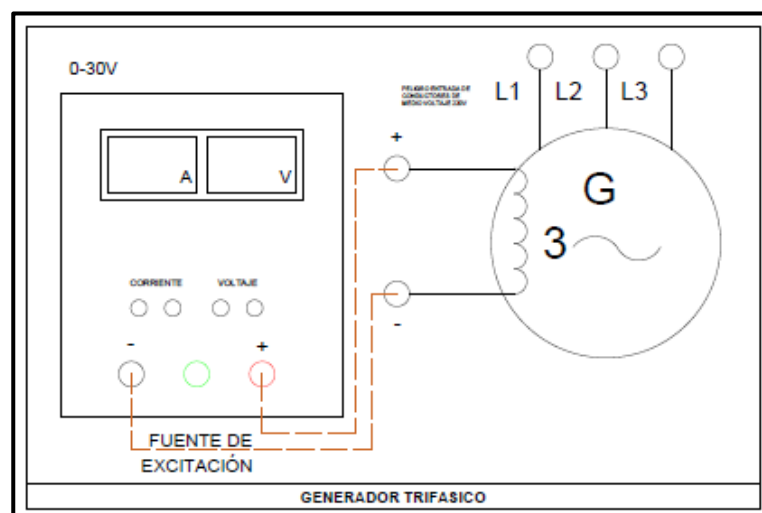


Figura 5. Conexión entre fuente de excitación y generador

6. En el módulo 1 conectar las salidas de líneas 1 y 2 del generador con los plub 1 y 2 del módulo de sincronismo y el plub NO del módulo de sincronismo conectar con el plub del contactor K1

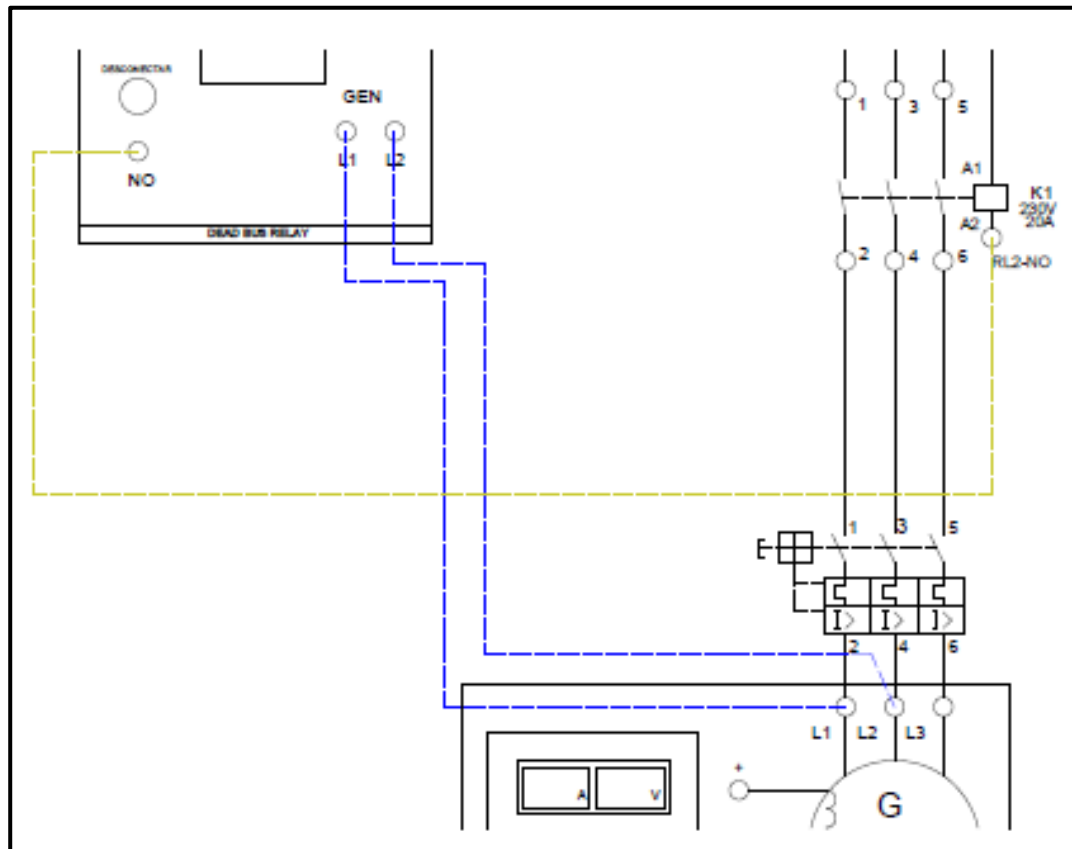


Figura 6. Conexión entre el módulo de sincronismo y las salidas de líneas del generador

7. Conexiones entre módulo de sincronismo 1 y el módulo de cargas

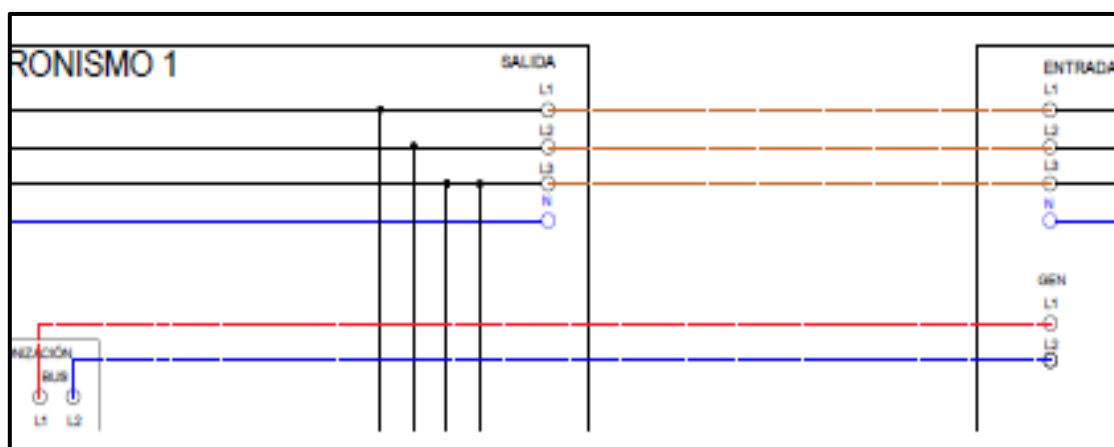


Figura 7. Conexiones entre módulos

8. Conexiones entre módulo de cargas y el módulo de sincronismo 2

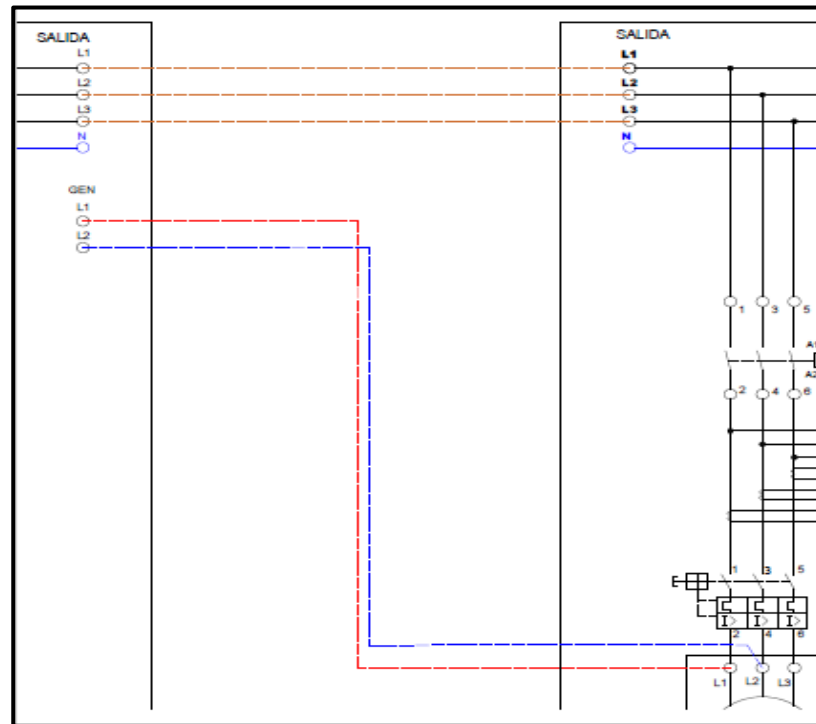


Figura 8. Conexiones entre módulos

9. Conexión entre el contactor K1 y la línea 1 del módulo de sincronismo 2

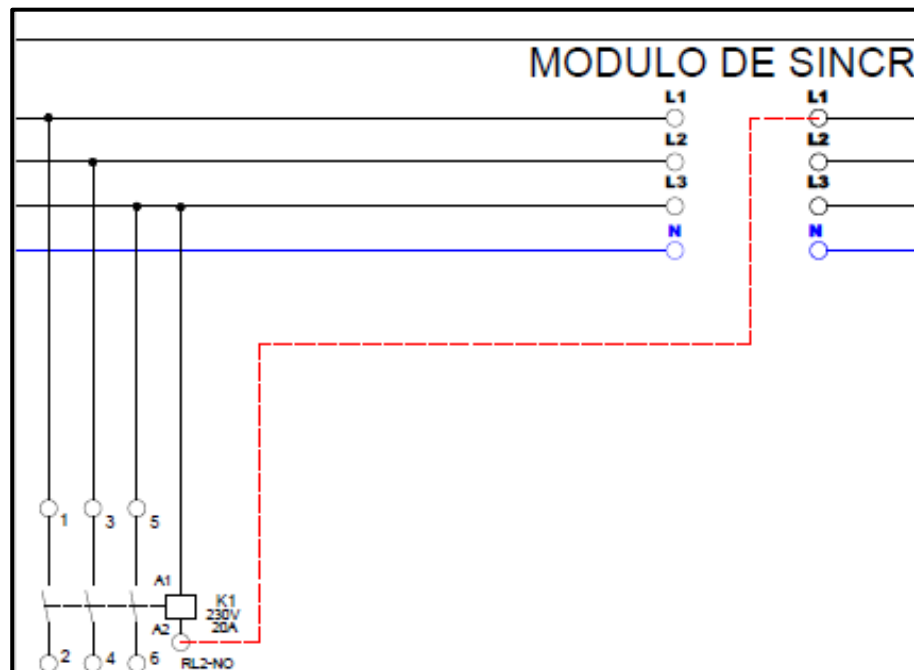


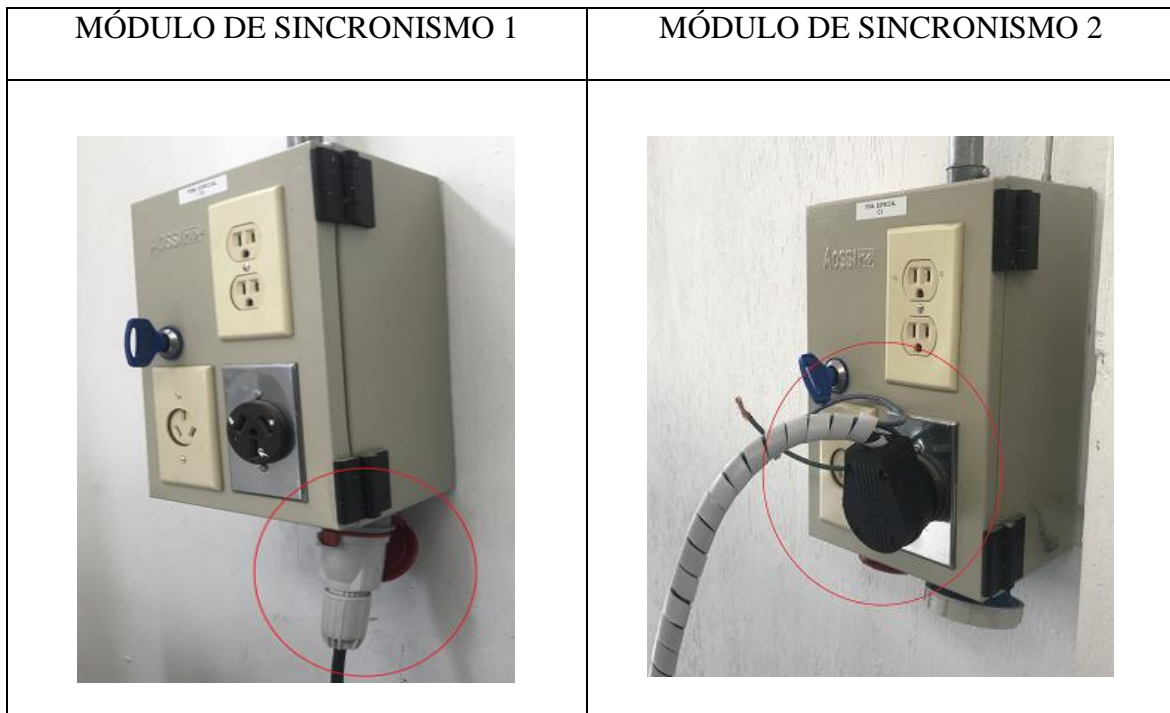
Figura 9. Conexión entre el contactor y la línea

10. Volver a realizar los pasos 4 y 5 en el módulo 2

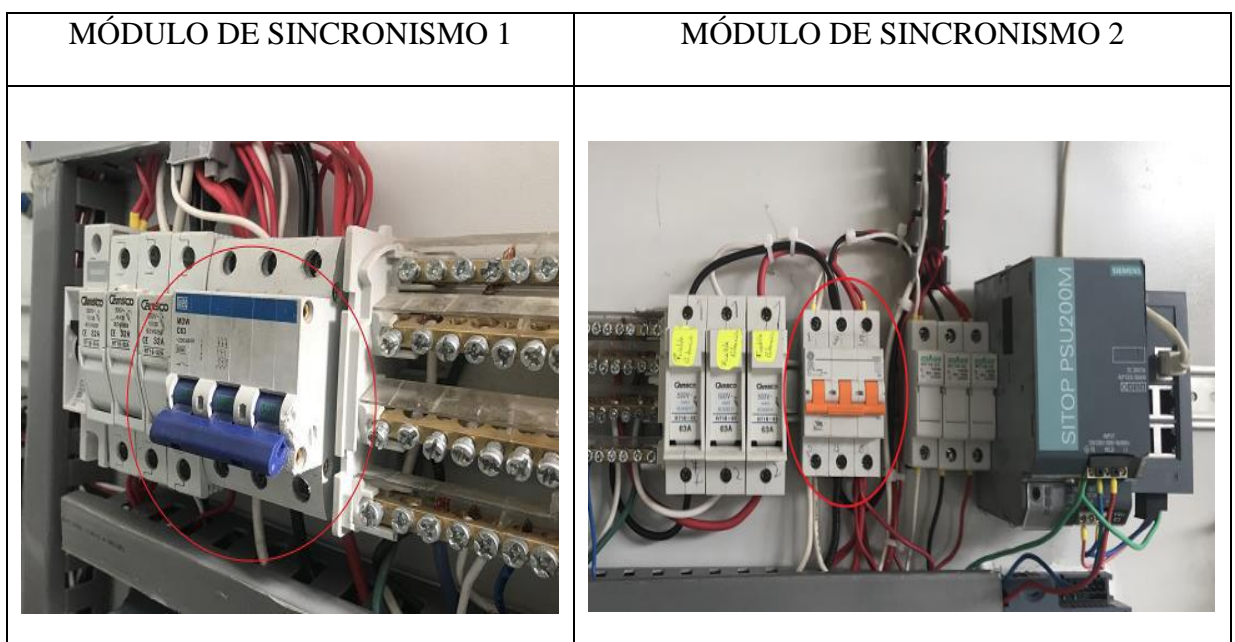
2.9. METODOLOGÍA Y TÉCNICA EXPERIMENTAL

Para la sincronización en paralelo de dos generadores realizar los siguientes pasos:

1. Alimentar los módulos 1 y 2 conectándolos directamente desde la red



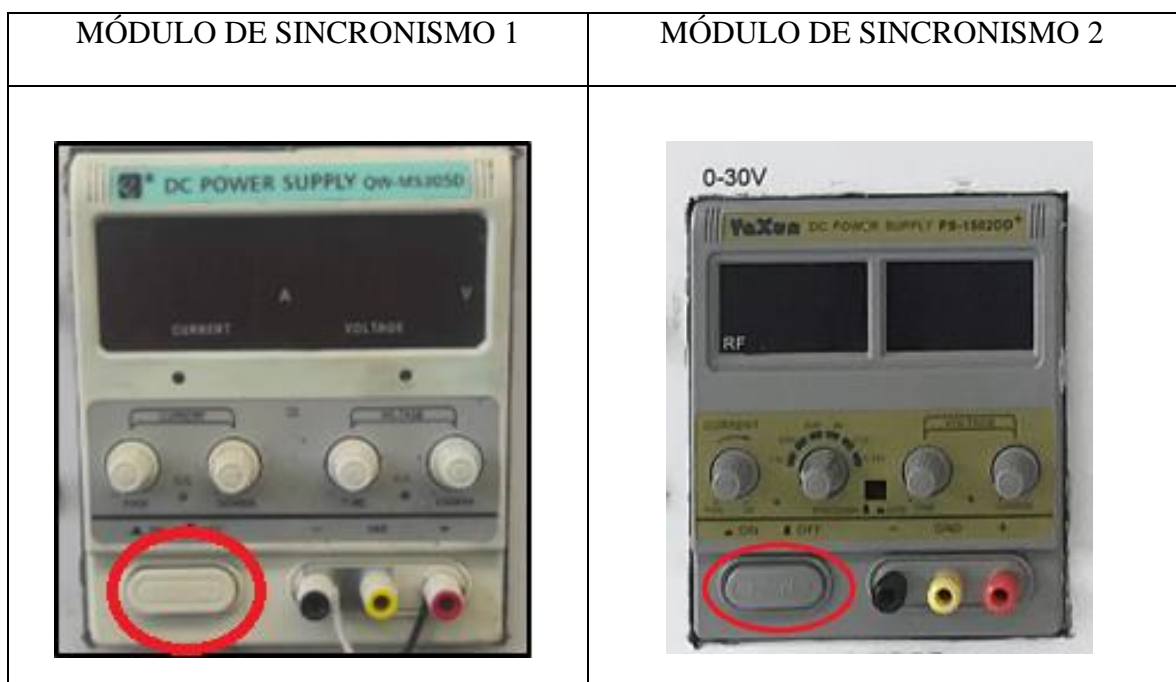
2. Accionar los brakers principales del módulo de sincronismo 1 y del módulo de sincronismo 2 ubicados en la parte posterior de los mismos



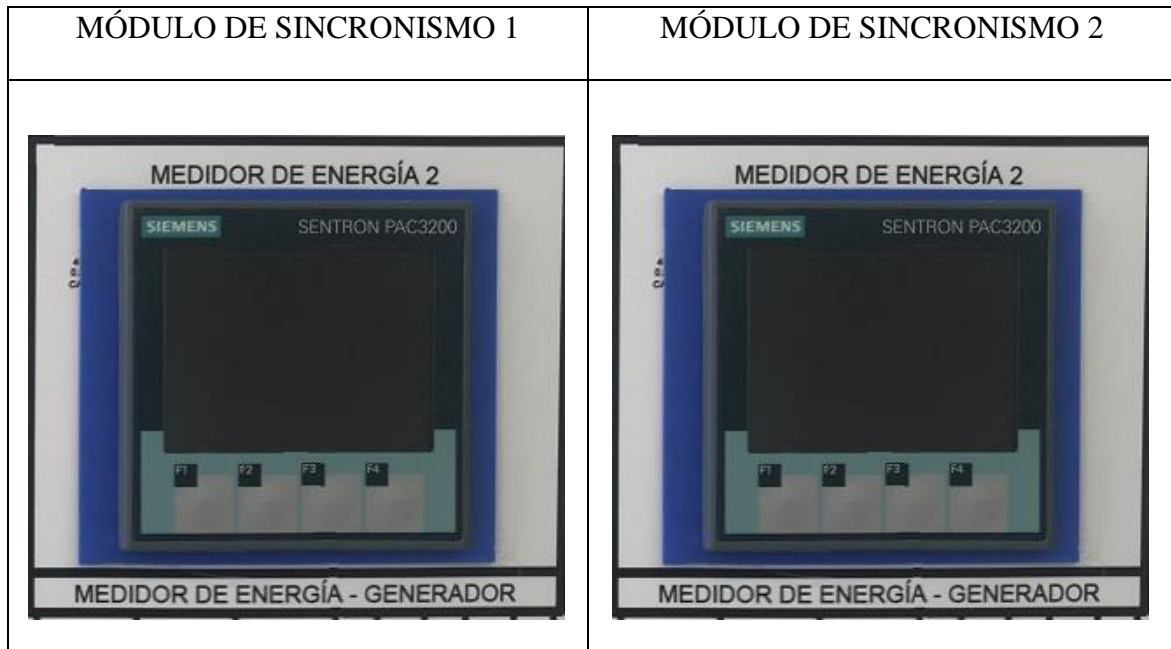
3. Encender el selector del variador para arrancar el generador y verificar que el potenciómetro del variador se encuentre en 0



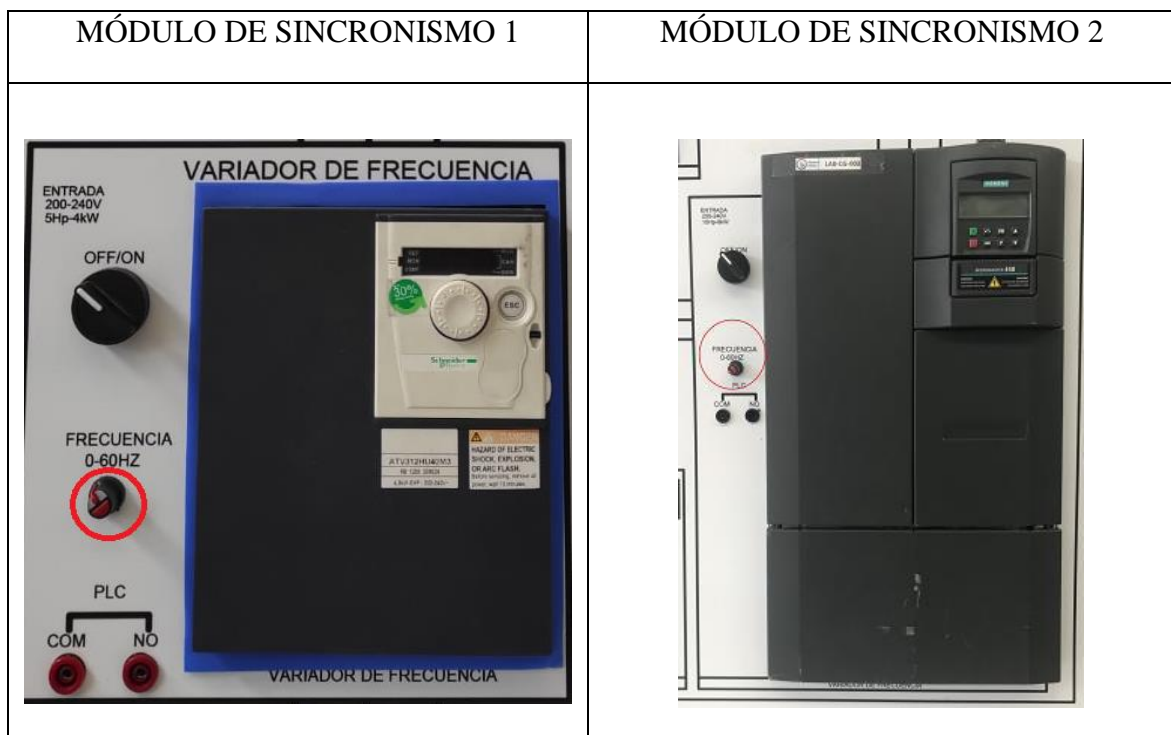
4. Encender las fuentes de excitación tanto del módulo de sincronismo 1 como la del módulo de sincronismo 2 y verificar que su valor de tensión este en 0 V



5. Excitar a los generadores de los módulos 1 y 2 desde la fuente de excitación hasta que tengan un valor similar de tensión y verificarlos en los medidores de energía (SENTRON PAC)



6. Llevar a los dos generadores a la misma frecuencia (60 Hz) mediante los potenciómetros ubicados a lado izquierdo de cada variador de frecuencia



7. Verificar en el módulo de sincronismo del módulo 1 que los valores tanto de tensión y de frecuencia de los generadores tanto del módulo 1 y 2 tengan un rango de similitud
8. Girar el selector del módulo de sincronismo para la sincronización en paralelo de dos generadores

3. BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE

Para fines académicos el estudiante deberá registrar los voltajes de línea-línea que se pueden observar en los medidores de energía 2 y 2 de los dos módulos de sincronismo.

MEDIDOR DE ENERGÍA 2 - MÓDULO 1	
L1	
L2	
L3	

MEDIDOR DE ENERGÍA 2 - MÓDULO 2	
L1	
L2	
L3	

De igual manera se deberán registrar los valores de frecuencia.

MEDIDOR DE ENERGÍA 2 - MÓDULO 1	
F	

MEDIDOR DE ENERGÍA 2 - MÓDULO 2	
F	

Estos registros se realizan con el fin de observar que los parámetros cuentan con un rango de similitud ya que es necesario de los mismos al momento de realizar la sincronización de los 2 generadores en paralelo.