

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



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

**ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS DE
GARRA EN UN PEQUEÑO SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA EN EL
LABORATORIO DE CIELE.**

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

Autor:

Kevin Alexander Yacelga Viteri

Director:

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

Ibarra – Ecuador

2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004542211		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Yacelga Viteri Kevin Alexander		
DIRECCIÓN:	Diego de Almagro 1-48 y Rene Descártez		
EMAIL:	kayacelgav@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0980117516

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS DE GARRA EN UN PEQUEÑO SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA EN EL LABORATORIO DE CIELE."
AUTOR (ES):	Yacelga Viteri Kevin Alexander
FECHA: DD/MM/AAAA	03/07/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 03 días del mes de julio de 2023

EL AUTOR:


Nombre: Kevin Yacelga

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza

CERTIFICA

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante: Kevin Alexander Yacelga Viteri, certificó que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: "ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS DE GARRA EN UN PEQUEÑO SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA EN EL LABORATORIO DE CIELE" para la obtención del título de ingeniero en Mantenimiento Eléctrico

En la ciudad de Ibarra, a los 03 días del mes de julio del 2023

Lo certifico:



Ing. Jhonny Javier Barzola Iza

DIRECTOR DE TESIS

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a:

A Dios quien ha sido mi guía, fortaleza y su mano de fidelidad y amor han estado conmigo hasta el día de hoy.

A mis padres y hermano Eliza Viteri, Hernan Yacelga y Felipe Yacelga, quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todas mis amigas, por apoyarme cuando más las necesitaba, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, al haberme no hecho rendir en los momentos más difíciles y apoyarme como ninguna otra manera nadie lo a hecho para poder salir adelante y poder culminar con esta etapa de mi vida, siempre estaré agradecido por esto de lo mas profundo de mi corazón.

Kevin Yacelga

AGRADECIMIENTO

A mis padres:

“Ustedes han sido la fuerza impulsora detrás de mis sueños y esperanzas y han estado a mi lado durante los días y noches más difíciles de mis estudios. Han sido mis mejores guías en la vida. Hoy, al graduarme, les dedico este logro a ustedes, queridos padres, ya que se logra otra meta en este momento tan importante”.

Gracias por ser quienes son y por creer en mí.

Kevin Yacelga

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
TABLA DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
Resumen	xii
Abstract.....	xiii
Siglas.....	xiv
Introducción	xv
Contextualización.....	xv
Problemática.....	xvii
Objetivos.....	xviii
Objetivo General.....	xviii
Objetivos Específicos.....	xviii
Justificación	xix
Alcance.....	xx
Capítulo I	1
Fundamentación Teórica	1
Analizar los parámetros de funcionamiento de un GS mediante su modelo de polos de garra... 1	
1. Principio de generación en corriente alterna	1
1.1. Campo giratorio	1
1.1.1. Flujo de potencia	1
1.2. Estructura del generador síncrono	3
1.2.1. Topologías.....	3
1.2.2. Tipos de generador síncrono	3
1.2.2.1. El generador de imanes permanentes	3
1.2.2.2. El generador de reluctancia	4
1.2.2.3. El generador síncrono de polos de garra	5
1.3. Diseño del generador de polos de garra	6
1.3.1. Circuito magnético equivalente	7
1.3.2. Geometría de los polos de garra.....	9
1.3.3. Cantidad de polos.....	9

1.4.	Funcionamiento del generador síncrono de polos de garra.....	9
1.4.1.	Aplicaciones automotrices	9
1.4.1.1.	Motor de arranque/alternador	9
1.4.1.2.	Freno regenerativo	11
1.4.2.	Funcionamiento de forma aislada	11
1.4.3.	Funcionamiento en paralelo.....	13
1.4.4.	Voltaje.....	13
1.4.5.	Frecuencia.....	14
1.4.6.	Secuencias de fase.....	14
1.4.7.	Amplitud, frecuencia y ángulo de fase.....	15
1.4.8.	Método de sincronización	17
1.4.9.	Sincronización manual.....	18
1.4.10.	Operación de generadores en paralelo con grandes sistemas de potencia	21
1.4.11.	Operación de generadores en paralelo con otros generadores del mismo tamaño 23	
1.4.12.	Curva de capacidad del generador síncrono.....	24
Capítulo II.....		26
Características de funcionamiento de un generador síncrono de polos de garra dentro de un Sistema Eléctrico de Potencia.....		26
1.	Metodología	26
2.	Sistema propuesto para la conexión de generadores sincrónicos en paralelo	28
2.1.	Modelación de dispositivos para conexión en paralelo.....	32
2.1.1.	Circuito equivalente de un generador síncrono	33
2.1.2.	Diseño eléctrico de módulo de sincronización de generadores de polos de garra.....	34
2.2.	Preparación del tablero de prueba	34
2.2.1.	Etapa 1 funcionamiento un grupo motor generador y una carga resistiva	37
2.2.2.	Etapa 2 adición de una carga resistiva.....	39
2.2.3.	Fase 3 puesta en paralelo de generadores síncrono de polos de garra.....	40
2.2.4.	Etapa 4 adición de una carga capacitiva.....	42
2.3.	Dimensionamiento de elementos	42
2.4.	Materiales y software	44
2.4.1.	Generadores sincrónicos	44
2.4.2.	Motor de inducción jaula de ardilla.....	45
2.4.3.	Variador de velocidad	45
2.4.4.	Contactador eléctrico.....	46

2.4.5. Medidor de energía.....	46
2.4.6. Cargas eléctricas	47
2.5. Diseño mecánico de módulo	47
2.6. Estructura metálica del módulo	48
Capitulo III.....	52
Implementación de módulo de pruebas para sincronización de generadores síncronos de polos de garra	52
3. Materiales y costos asociados	52
3.1. Implementación del módulo motor-generator	55
3.2. Establecimiento de tablero de control	56
3.3. Ensamblaje de circuito de fuerza	56
3.4. Variador de frecuencia.....	57
3.5. Pruebas de funcionamiento	58
3.5.1. Ensayo a 6V (0.5 pu)	58
3.5.2. Ensayo a 12V (1 pu)	61
3.6. Conclusiones	66
3.7. Recomendaciones	67
Anexo Registro gráfico de construcción de módulo.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Campo giratorio de un generador síncrono.	1
Fig. 2. Flujo de la potencia en el generador síncrono.	2
Fig. 3. Rotor de un alternador de imanes permanentes.	4
Fig. 4. Configuración eléctrica, magnética, mecánica del rotor.	4
Fig. 5. Generador de reluctancia.	5
Fig. 6. Generador síncrono de polos de garra.	6
Fig. 7. Circuito magnético tridimensional.	7
Fig. 8. Circuito magnético equivalente.	8
Fig. 9. Densidad de flujo de espacio de aire sin carga ideal.	8
Fig. 10. Red de potencia del vehículo.	11
Fig. 11. Características exteriores.	12
Fig. 12. Características de regulación.	12
Fig. 13. Generadores conectados en paralelo.	13
Fig. 14. Secuencia de fases.	14
Fig. 15. Amplitud de tensión.	15
Fig. 16. Frecuencia del generador y del bus.	15
Fig. 17. Los ángulos de fase deben coincidir.	16
Fig. 18. Ventana de sincronización.	16
Fig. 19. Panel de sincronización.	18
Fig. 20. Sincroscopio.	19
Fig. 21. Sincronización con lámparas incandescentes.	20
Fig. 22. Curvas de bus infinito.	21
Fig. 23. Diagrama de casa de frecuencia contra potencia.	22
Fig. 24. Diagrama de casa de frecuencia contra potencia justo después de la conexión en paralelo.	22
Fig. 25. Diagrama de casa de frecuencia contra potencia si la frecuencia en vacío del generador es un poco menor a la frecuencia del sistema antes de la conexión en paralelo.	23
Fig. 26. Diagrama de casa de potencia-frecuencia del sistema después de que el generador se conecta en paralelo con la línea.	24
Fig. 27. Efecto en el sistema debido al incremento de los puntos de ajuste del mecanismo regulador del generador 2 en operación.	24
Fig. 28. Diagrama fasorial del generador.	25
Fig. 29. Flujograma de proceso metodológico.	27
Fig. 30. Diagrama de bloques del pequeño sistema eléctrico de potencia.	28
Fig. 31. Sistema de prueba para conexión en paralelo.	29
Fig. 32. Voltajes de sincronización.	30
Fig. 33. Frecuencia de sincronización.	30
Fig. 34. Potencia del generador 1.	31
Fig. 35. Potencia del generador 2.	32
Fig. 37. Modelo equivalente de generador síncrono.	33
Fig. 38. Diagrama de fuerza para sincronización de generadores.	36
Fig. 39. Diagrama de control para sincronización de generadores.	37
Fig. 40. Etapa 1 de tablero de sincronización de generadores.	39

Fig. 41. Etapa 2 de tablero de sincronización de generadores.....	40
Fig. 42. Etapa 3 de tablero de sincronización de generadores.....	41
Fig. 43. Etapa 4 de tablero de sincronización de generadores.....	42
Fig. 44. Motor primario	45
Fig. 45. Variador de velocidad ZONCN NZ100	46
Fig. 46. Contactador Din Cjx2 1810.....	46
Fig. 47. Medidor PZEM-004 Pantalla LCD Digital.....	47
Fig. 48. Carga resistiva	47
Fig. 49. Módulo de sincronización de generadores síncronos de polos de garras.....	48
Fig. 50. Base para grupo motor-generador.....	48
Fig. 51. Soporte para grupo motor-generador.....	49
Fig. 52. Estructura base y Acople generador-motor	49
Fig. 53. Estructura de módulo de pruebas	50
Fig. 54. Diseño de tableros.....	51
Fig. 55. Vista tridimensional de tablero de pruebas.....	51
Fig. 56. Implementación del grupo motor-generador	55
Fig. 57. Instauración de tablero de control.....	56
Fig. 58. Instauración de circuito de fuerza	56
Fig. 59. Comparación de resultados obtenidos generador 1 (0.5 pu)	58
Fig. 60. Comparación de resultados obtenidos generador 2 (0.5 pu)	59
Fig. 61. Comparación de resultados de voltaje obtenidos en el generador 1 (0.5 pu).....	60
Fig. 62. Comparación de resultados de voltaje obtenidos en el generador 2 (0.5 pu).....	61
Fig. 63. Comparación de resultados obtenidos generador 1 (1pu).....	62
Fig. 64. Comparación de resultados obtenidos generador 2 (1pu).....	63
Fig. 65. Comparación de resultados de voltaje obtenidos en el generador 1 (1 pu).....	64
Fig. 66. Comparación de resultados de voltaje obtenidos en el generador 2 (1 pu).....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Etapas de funcionamiento de módulo de pruebas	35
Tabla 2 Características del motor	43
Tabla 3 Características del generador	43
Tabla 4 Equipos y materiales para el módulo de pruebas de funcionamiento del generador <i>síncrono</i>	44
Tabla 5 Características de los generadores síncronos	44
Tabla 6 Lista de materiales y costos	52
Tabla 7 Proceso de configuración de variador de frecuencia.....	57

Resumen

En la actualidad existe una mayor demanda de energía eléctrica, con el pasar del tiempo se ha desarrollado diferentes tecnologías para solventar dicha demanda, una de las más importantes son los generadores síncronos trifásicos los cuales poseen una gran capacidad de generación en el sector industrial. El estudio de comportamiento de los generadores síncronos tanto en condiciones de estado estable, como en condiciones dinámicas es fundamental en las actividades de análisis, control y operación del Sistema Eléctrico. Por lo tanto, este estudio propone el diseño e implementación de un módulo que permite monitorear y controlar la puesta en marcha de dos generados síncronos de polos de garras en un sistema de potencia. En primera instancia se realiza una investigación bibliográfica a cerca de los parámetros de funcionamiento de los generadores síncronos, específicamente mediante su modelo polos de garra. Posteriormente, se analiza las condiciones necesarias que deben cumplir los generados para la puesta su puesta en paralelo dentro de un sistema eléctrico de potencia (SEP). Una vez establecidos los conceptos esenciales se procede a modelar el SEP en el software MATLAB, con la finalidad de prever su funcionamiento previo a la implementación. Luego, se realiza el diseño eléctrico y mecánico del módulo de pruebas, para pasar a su posterior implementación. Por último, las pruebas del módulo muestran que la puesta en paralelo de los generados síncronos de polos de garra es posible siempre y cuando cumplan con 4 requisitos esenciales: la tensión del generador entrante debe coincidir con la tensión generador en funcionamiento; la frecuencia de todos los generadores debe ser igual; la secuencia de los generadores debe coincidir y los ángulos de fase deben ser iguales. Además, se comprueba que un funcionamiento en estado estable de los generados es posible y concuerda con los resultados obtenidos de la simulación.

Abstract

Currently, there is an increased demand for electrical energy. Over time, various technologies have been developed to meet this demand, one of the most important being three-phase synchronous generators, which have a high generation capacity in the industrial sector. The study of the behavior of synchronous generators, both under steady-state and dynamic conditions, is fundamental in the analysis, control, and operation activities of the Electrical System. Therefore, this study proposes the design and implementation of a module that allows monitoring and controlling the start-up of two claw-pole synchronous generators in a power system. Initially, a bibliographic investigation is carried out about the operating parameters of synchronous generators, specifically through their claw-pole model. Subsequently, the necessary conditions that the generators must meet for their parallel start-up within a power electrical system (PES) are analyzed. Once the essential concepts are established, the PES is modeled in MATLAB software, with the aim of predicting its operation prior to implementation. Then, the electrical and mechanical design of the test module is carried out, followed by its subsequent implementation. Finally, the tests of the module show that the parallel start-up of the claw-pole synchronous generators is possible as long as they meet four essential requirements: the voltage of the incoming generator must match the voltage of the operating generator; the frequency of all generators must be the same; the sequence of the generators must match, and the phase angles must be equal. In addition, it is verified that a steady-state operation of the generators is possible and agrees with the results obtained from the simulation.

Siglas

Sigla	Interpretación
CC	Corriente continua
p. u	por unidad
MATLAB	Laboratorio matricial
CIELE	Laboratorio de máquinas de la carrera de electricidad
CD	Corriente directa
CA	Corriente alterna
ICE	Motor de combustión interna
PWM	Convertidor de ancho de pulso
MOSFET	Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor
IPM	Alternador de imanes interpolares
CPA	Polos de garras
P	Potencia activa
Q	Potencia reactiva
fp	Factor de potencia
SEP	Sistema eléctrico de potencia
VLL	Tensión de línea
GSI	Transformador elevador del generador

Introducción

Contextualización

En la actualidad es muy común el uso de la energía eléctrica y más aún con el incremento del sector industrial existe una mayor demanda de esta. La energía eléctrica llega a los consumidores a través de un sistema eléctrico el cual está compuesto por una red de transmisión, subtransmisión y distribución, las mismas que deben tener fiabilidad y un alto rendimiento como características esenciales, la red de distribución tiene por objetivo el hacer que en la energía llegue al consumidor final. (Manuel Alcázar Ortega, 2019)

Hoy en día el estudio de los Sistemas Eléctricos de Potencia es de gran importancia pues existen requisitos técnicos con los que se debe operar para mantener una operación estable y limitar las consecuencias ante la ocurrencia de contingencias como un riesgo de pérdida de estabilidad de frecuencia ocasionado por perturbaciones en el Sistema Nacional Interconectado. (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2020)

La energía eléctrica puede ser generada por distintas fuentes, una de ellas es el uso de los generadores síncronos o también llamados alternadores los cuales son máquinas síncronas que se utilizan para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de ca. Es importante el estudio de la operación de dichos generadores síncronos, tanto cuando operan solos como cuando lo hacen junto con otros generadores. (Chapman, 2012)

El generador síncrono es uno de los elementos más importantes dentro de los Sistemas Eléctricos de Potencia y se caracteriza por un núcleo laminado de estator uniformemente ranurado que aloja un devanado de ca de tres, dos o una fase y un rotor de saliente variable o excitado por corriente continua. (Boldea, Synchronous Generators, 2016)

Existe una gran variedad de modelos de generadores síncronos, uno de ellos es el generador síncrono modelo polos de garra los cuales se constituyen ahora principalmente como alternadores de automóviles, los costos totales de estos generadores incluido el control de la corriente de campo y el rectificador de potencia, son bajos y también lo es el volumen específico. En los generadores de polo de garra la bobina de excitación en forma de anillo único produce un campo de espacio de aire multipolar con un volumen de cobre reducido y pérdidas de potencia

de cc (corriente continua). Aunque se utilizan anillos colectores y escobillas, la potencia transmitida a través de ellos es pequeña por lo tanto se utilizan pequeños dispositivos electrónicos de potencia para controlar la salida. (Boldea, Synchronous Generators, 2016)

Problemática

Hoy en día el incremento del uso energía por parte de la humanidad ha motivado a las personas explorar formas alternativas de generación de energía. De tal manera los generadores síncronos son los más comunes de generar energía eléctrica para el uso domiciliario e industrial, hoy por hoy esas máquinas son las más usadas por las múltiples ventajas, aplicaciones y beneficios que presentan. Sin embargo, para el análisis de estos generadores es necesario contar con softwares como MATLAB para realizar el respectivo análisis de su funcionamiento y se debe realizar varias simulaciones para obtener resultados acertados, otra forma de realizar el análisis es mediante la implementación de un módulo de pruebas de un generador síncrono que permita tomar mediciones de operación.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el funcionamiento de un generador síncrono de polos de garra dentro de un pequeño Sistema Eléctrico de Potencia en el laboratorio de CIELE.

Objetivos Específicos

- Analizar los parámetros de funcionamiento de un generador síncrono mediante su modelo de polos de garra.
- Describir las características de funcionamiento de un generador síncrono de polos de garra dentro de un Sistema Eléctrico de Potencia.
- Implementar un módulo de pruebas de funcionamiento del generador síncrono de polos de garra dentro de un Sistema Eléctrico de Potencia.

Justificación

La presente investigación se enfocará en analizar el funcionamiento de un generador síncrono en un Sistema Eléctrico de Potencia. En la actualidad existe una mayor demanda de energía eléctrica, con el pasar del tiempo se ha desarrollado diferentes tecnologías para solventar dicha demanda, una de las más importantes son los generadores síncronos trifásicos los cuales poseen una gran capacidad de generación en el sector industrial. El estudio de comportamiento de los generadores síncronos tanto en condiciones de estado estable, como en condiciones dinámicas es fundamental en las actividades de análisis, control y operación del Sistema Eléctrico. Por lo tanto, es de gran utilidad la implementación de un módulo que permita realizar las respectivas mediciones para el análisis de los generadores síncronos.

Alcance

El siguiente trabajo de grado está destinado a realizar el análisis de funcionamiento de un generador síncrono de polos de garra en un pequeño Sistema Eléctrico de Potencia el cual se implementará con un alternador, resistencias e inductancias en el laboratorio de CIELE; para el análisis se realizará simulaciones con la ayuda del software MATLAB en dónde se diseñará el circuito y las respectivas pruebas de funcionamiento. También se realizará la implementación de un módulo de pruebas de funcionamiento de generador síncrono para tomar las respectivas mediciones de operación en estado estable tales como frecuencia, voltaje de generación y de barra, corriente y potencia inyectada al pequeño Sistema Eléctrico de Potencia para 0.5 y 1 p.u. de funcionamiento. El alternador tendrá una potencia nominal de 1hp. Se hará una comparación de los resultados obtenidos de la simulación del Software con los resultados tomados con las mediciones.

Capítulo I

Fundamentación Teórica

Analizar los parámetros de funcionamiento de un GS mediante su modelo de polos de garra.

1. Principio de generación en corriente alterna

Al tratarse de una corriente bidireccional que cambia continuamente de polaridad, las corrientes alternas se distinguen por sus cambios periódicos de polaridad.

1.1. Campo giratorio

La figura 1 muestra el campo giratorio de un generador síncrono cuando se suministra una corriente continua (CD) al devanado del rotor para crear un campo magnético. Un motor primario hace girar inmediatamente el rotor del generador síncrono, creando un campo magnético giratorio dentro del dispositivo. Los devanados del estator del generador experimentan una serie de tensiones trifásicas como resultado del campo magnético que se produce. El generador síncrono tiene devanados de armadura que inducen la tensión principal y devanados de campo que se encargan de crear el campo magnético primario de la máquina.



Fig. 1. Campo giratorio de un generador síncrono.

Fuente: (Blogger, 2017)

1.1.1. Flujo de potencia

Los generadores síncronos son dispositivos que transforman la energía mecánica en energía eléctrica de corriente alterna (CA). Independientemente de la demanda de energía, la fuente de energía mecánica del generador síncrono debe mantener una velocidad constante. La frecuencia resultante del sistema eléctrico puede cambiar si la fuente no posee esta cualidad.

No toda la energía mecánica que entra en un generador síncrono se transforma en energía eléctrica. Las pérdidas de la máquina se representan por la diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida. En contraste, la potencia mecánica de entrada se relaciona con la fuerza del eje del generador, que es igual a la potencia de entrada multiplicada por el par aplicado y por la velocidad angular. La potencia mecánica, que se convierte internamente en potencia eléctrica, viene dada por la potencia convertida, que es igual al triple de la tensión de fase por la corriente de fase y por el coseno del ángulo (Chapman, 1987, pág. 157).

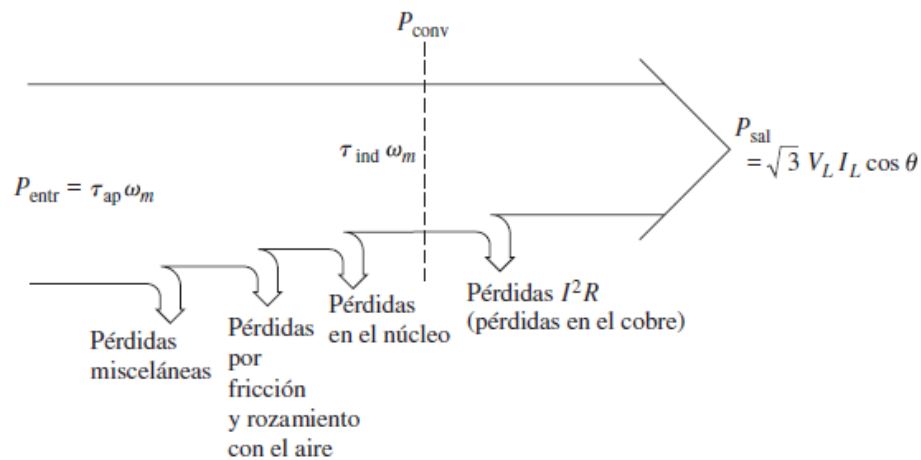


Fig. 2. Flujo de la potencia en el generador síncrono.

Fuente: (Chapman, 1987)

Las pérdidas mecánicas del núcleo de la máquina se describen por la diferencia entre la potencia de entrada y la potencia convertida (Figura 2). Por otro lado, la potencia real y potencia reactiva del generador síncrono se calcula de la siguiente manera:

- El producto entre la raíz cuadrada de tres, la tensión de línea, la corriente de línea y el coseno del ángulo θ , representa la potencia eléctrica de salida en proporciones de línea a línea.
- La cantidad de potencia eléctrica producida en cantidades fasoriales es igual al producto de tres veces la tensión de fase, la corriente de fase y el coseno del ángulo θ .
- El producto entre la raíz cuadrada de tres, la tensión de línea, la corriente de línea y el seno del ángulo θ , el valor resultante corresponde a los valores de potencia reactiva de salida en números de línea a línea.

- d) En valores fasoriales, la potencia reactiva de salida es igual al triple de la tensión de fase, la corriente de fase y el seno del ángulo.

1.2. Estructura del generador síncrono

Un generador síncrono consta de dos componentes básicos: el estator, que está fijo, y el rotor, que gira. Los cojinetes unen estos dos componentes. Entre el estator y el rotor hay un espacio que se conoce como entrehierro.

1.2.1. Topologías

Existen tres diseños diferentes de generadores síncronos: generador síncrono sin escobillas, polo saliente del rotor y polo saliente del estator.

Polos salientes en el estator

Este generador se distingue por tener el inducido en el rotor, lo que se observa en las máquinas de baja y media velocidad. El estator de este generador se forma por un conjunto de láminas de acero al silicio, que tienen la propiedad de que el flujo magnético fluye a través de ellas.

Polos salientes del rotor

El inducido de este generador se encuentra dentro del estator, lo que elimina la necesidad de un anillo colector para extraer la tensión producida. En su lugar, bastarían dos anillos con el fin de introducir la tensión de campo, ya que el inducido se encuentra fuera de la máquina.

1.2.2. Tipos de generador síncrono

Para minimizar las pérdidas por corrientes de Foucault, el rotor del generador se construye apilando láminas finas y se coloca de forma concéntrica con el estator. Además, es sensible a las fluctuaciones de los campos magnéticos. Por otro lado, el rotor puede ser de varios tipos, incluyendo polos prominentes, imanes cilíndricos, internos y externos. Asimismo, dependiendo del diseño eléctrico, se tiene el magnético y mecánico.

1.2.2.1. El generador de imanes permanentes

La figura 3 muestra el rotor de un alternador de imanes permanentes. Al utilizar imanes permanentes en el rotor, se generan potentes campos magnéticos sin necesidad de ser alimentados, por lo que se resuelven las dificultades del bobinado de excitación.

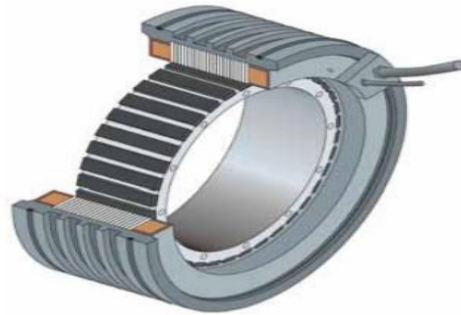


Fig. 3. Rotor de un alternador de imanes permanentes.

Fuente: (Brvo Moya, 2008)

En la figura 4 se tiene la configuración eléctrica, magnética y mecánica del rotor. En este sentido, los imanes pueden estar colocados en el rotor de diversas maneras, donde las más habituales son:

- a) Sobre la superficie del rotor(aumenta el entrehierro).
- b) Embebidos en el interior del rotor con magnetización radial.
- c) Embebidos en el interior del rotor con magnetización circunferencial.

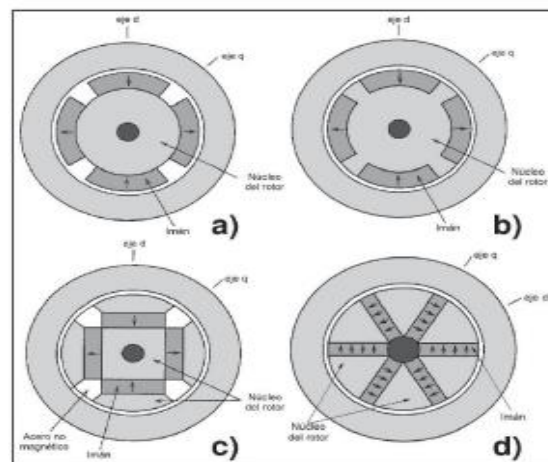


Fig. 4. Configuración eléctrica, magnética, mecánica del rotor.

Fuente: (Rodríguez Pozueta, 2015)

1.2.2.2. El generador de reluctancia

Las máquinas síncronas de reluctancia pueden funcionar como generadores auto excitados. Esto sucede cuando su rotor se acciona por un motor de arrete que gira a velocidad constante. Para lo cual, se deben conectar condensadores de capacidad suficiente a los

terminales de salida, para proporcionar la potencia reactiva necesaria para la autoexcitación (Martínez García & Navarro Gomez) .

Según (Martínez García & Navarro Gomez), el generador síncrono de reluctancia auto excitado ofrece las mismas ventajas que un generador de inducción. Es decir, que es una maquina sin escobillas, presenta menor tamaño y no necesita corriente continua para la autoexcitación, además, implica menores costes de fabricación y autoprotección contra sobrecargas y cortocircuitos. Asimismo, la frecuencia de la tensión de salida no se ve afectada por la carga ni por la capacidad de los condensadores conectados, más bien el valor requerido se obtiene ajustando la velocidad del motor de arrastre. En la figura 5 se presenta un generador de reluctancia que incluye un entrehierro, un polo interior del estator, un polo exterior del estator y un polo del rotor.

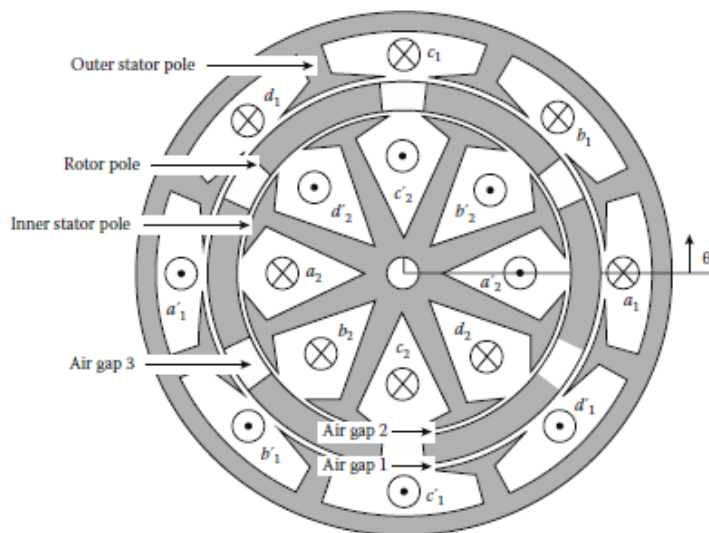


Fig. 5. Generador de reluctancia.

Fuente: (Martínez García & Navarro Gomez)

1.2.2.3. El generador síncrono de polos de garra

Este generador síncrono consta de una sola bobina de excitación de corriente continua (CC) en forma de anillo, la cual es accionada por anillos rozantes y escobillas. Además, el generador consta de un rotor de garras sólidas. Es así como, esta máquina se perfila como un generador fácil de usar, ya que posee poca pérdida de potencia de excitación.

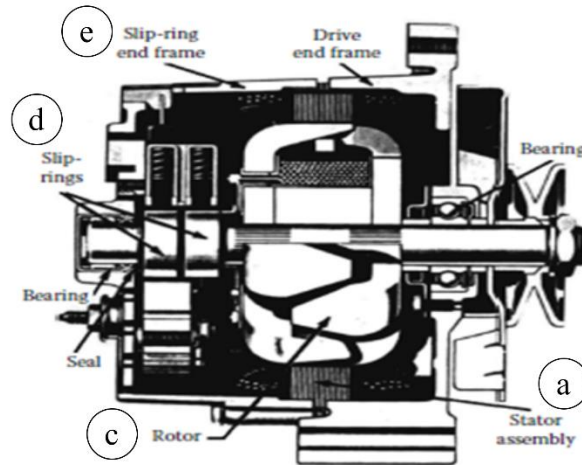


Fig. 6. Generador síncrono de polos de garra.

Fuente: (Boldea, 2006)

A continuación, se detallan los componentes clave de un generador síncrono industrial con polos en garra:

- a) Un Núcleo de hierro del estator laminado con ranuras uniformes.
- b) Devanado trifásico de corriente alterna (CA): normalmente una capa con $q = 1, 2$ ranuras por polo y fase, conexión en estrella o en triángulo de las fases.
- c) Rotor de polos en forma de garra, formado por piezas de hierro macizo que rodean la bobina de excitación en forma de anillo alimentado por corriente continua (CC).
- d) Anillos rozantes de cobre con escobillas de baja caída de tensión, para transferir la potencia a la bobina de excitación de CC en el rotor.
- e) Cojinetes y un bastidor final compuesto por dos lados: el lado del anillo colector y el lado del accionamiento. En este sentido, el generador es accionado por el motor de combustión interna (ICE) a través de una transmisión por correa. (Boldea, 2006, pág. 196)

1.3. Diseño del generador de polos de garra

El generador de polos de garra está constituido por un núcleo de hierro que es el estator, el cual, se encuentra uniformemente ranurados y posee un devanado de CA (corriente alterna) trifásica. Este tiene dos ranuras por polo por cada fase, un rotor de garra fabricado de piezas de hierro macizo, el cual, rodea la bobina de excitación y se alimenta con CC (corriente continua). Además, este dispone de anillos deslizantes de cobre y rodamientos.

1.3.1. Circuito magnético equivalente

El circuito magnético equivalente parte de la observación de la trayectoria del flujo magnético principal, el cual se presenta tridimensionalmente en la figura 7. Esto corresponde a las condiciones en vacío cuando la corriente es nula en el estator, cada sección de la trayectoria del flujo se caracteriza por una reluctancia magnética:

- a) Entrehierro: R_g
- b) Diente del estator: R_{st}
- c) Yugo del estator: R_{sy}
- d) Garra, axial: R_{ca}
- e) Garra, radial: R_{cr}
- f) Yugo del rotor: $2R_{cy}$

Existen dos vías de fuga para la línea de flujo magnético principal: una tangencial y otra axial entre las garras: R_{ctl} y R_{cal} . Además, existe la reluctancia magnética de fuga de la ranura de la bobina de excitación en forma de anillo que es la bobina de excitación de CC: R_{csl} .

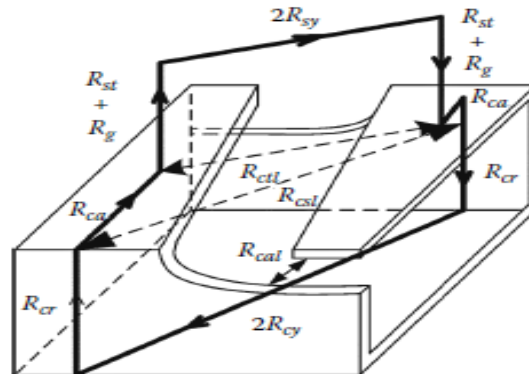


Fig. 7. Circuito magnético tridimensional.

Fuente: (Boldea, 2006)

La figura 8 representa un circuito magnético equivalente condensado para la ausencia de carga, en el que se desprecia el flujo axial entre las garras R_{cal} con el fin de condensar la reluctancia (Boldea, 2006). Para las secciones del estator R_{sy} , R_{st} y el entrehierro R_g , las fórmulas son sencillas (con aperturas de ranura nulas), por otro lado, para las secciones del rotor R_{cr} , R_{ca} , R_{cy} , R_{ctl} , las expresiones de la reluctancia magnética, incluidos los efectos de la saturación magnética, poseen un nivel de dificultad importante. Esto se debe a que la sección

transversal de los polos de la garra varía axialmente y también lo hace la permeabilidad magnética en ellos.

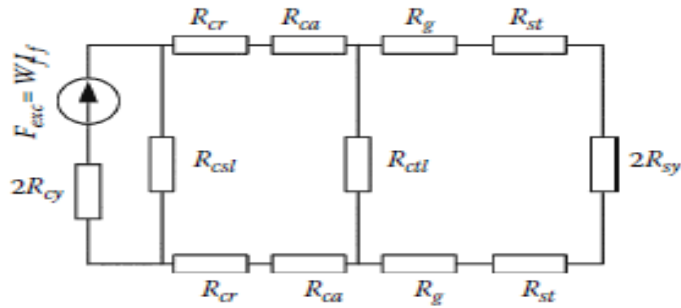


Fig. 8. Circuito magnético equivalente.

Fuente: (Boldea, 2006)

De esta manera se pueden obtener curvas de magnetización en vacío aceptables:

El valor cuadrático medio (RMS) de la fuerza electromagnética fundamental se representa por el producto de π , la raíz cuadrada de dos, las velocidades en revoluciones por segundo, los pares de polos, las vueltas por fase del estator y la fundamental del flujo polar del estator.

La distribución aproximada de la densidad de flujo del entrehierro que se observa en la figura 9 se debe considerar al determinar la conexión entre el flujo polar p_1 y la corriente de campo (Boldea I. , 2006).

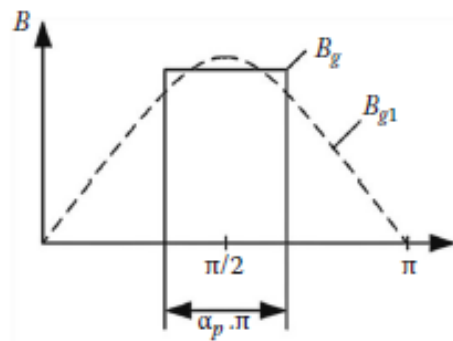


Fig. 9. Densidad de flujo de espacio de aire sin carga ideal.

Fuente: (Boldea, 2006)

1.3.2. Geometría de los polos de garra

Según (Boldea, 2006), la geometría de los polos de garra se define mediante algunos parámetros: α (adimensional), el ángulo del polo de la garra (φ_c), el paso del polo τ , la profundidad del polo de la garra (d_c), y el ancho del chaflán (W_c). $W1/\tau$ y $W2/\tau$ corresponden a las relaciones de anchura máxima y mínima de los polos de garra, los cuales se determinan con α , τ y el ángulo de la garra-polo φ_c , como variables ficticias.

1.3.3. Cantidad de polos

Es un generador trifásico que posee entre doce y dieciséis polos, con tres o seis ranuras para cada polo. El inducido se conecta a un rectificador de diodos trifásico de onda completa para proporcionar la tensión continua que necesita un automóvil. Como es una máquina compacta y duradera, se utiliza como generador en los automóviles.

1.4. Funcionamiento del generador síncrono de polos de garra

Según (Rodríguez Pozueta, 2015), es una máquina de polos salientes donde su rotor tiene una forma especial el cual está constituido por dos piezas simétricas. Estas piezas tienen la forma de un disco en cuya periferia salen varios polos en una forma triangular. Entre estas piezas se encuentra una bobina inductora que está arrollada alrededor del eje de la máquina, la cual genera los polos inductores y se alimenta con corriente continua CC a través de un colector de dos anillos.

1.4.1. Aplicaciones automotrices

El generador síncrono de polos de garras o generador Lundell se lo utiliza en la industria automotriz como motor de arranque/alternador con potencias por unidad de 5 kW y una velocidad de 18000 revoluciones por minutos.

1.4.1.1. Motor de arranque/alternador

El uso de generador síncrono de polos de garra o generador de Lundell como arrancador en vehículos eléctricos presupone el control de la frecuencia, por lo tanto, controla implícitamente la capacidad de rectificación durante la fase de generación.

El diseño del motor de arranque-alternador debe trabajarse teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Máximo par motor para arrancar y asistir al ICE a baja velocidad, y para impulsar la carga del compresor del aire acondicionado del ICE cuando el ICE está apagado.
- b) Máxima potencia de generación en función de la velocidad.

- c) Observación del estado de la batería y reducción de las pérdidas en el sistema para obtener una razonable vida útil de la batería.
- d) Mínimo volumen de la máquina y costes del convertidor de ancho de pulso (PWM).

Las principales especificaciones del generador de arranque Lundell son:

- a) Tensión nominal: 36 V (42 VDC bus)
- b) Potencia nominal: motorización, 3 kW; generación, 3,5 kW
- c) Par máximo: 56 Nm a 300 rpm
- d) Velocidad máxima permitida: 15.000 rpm
- e) Refrigeración por aire

Existen tres maneras para el ahorro de combustibles de los vehículos con sistemas de arranque/generador.

- a) Asistencia al arranque del ICE
- b) Ahorro de energía durante la “parada al ralenti”, cuando el ICE se apaga en los semáforos o en los atascos
- c) Frenado eléctrico regenerativo del vehículo en la medida en que la recarga de la batería lo permita, antes de que se produzcan molestias a los pasajeros.

Para ello, es importante sincronizar el control del generador de arranque Lundell mediante la excitación y el control del inducido mediante PWM. El módulo PWM de potencia es un transistor de efecto de campo semiconductor de óxido metálico inteligente (MOSFET).

Para esto es necesario coordinar la excitación y el control del inducido del control del generador de arranque Lundell a través de PWM. Se utiliza un módulo inteligente de transistores de efecto de campo de semiconductores de óxido metálico (MOSFET) PWM de potencia (MOSFET).

La máquina Lundell puede ser vectorial o de control directo de par y flujo DTFC, ya que conduce a un control inherentemente más robusto. La posición del rotor necesaria para el cálculo de la velocidad y en los observadores de flujo, pero no para la transformación de coordenadas en el control. Además, que se debe controlar con una unidad de potencia para minimizar las pérdidas de la máquina y los kilos voltamperios del inversor. El control de solo excitación del generador puede ser utilizarse con los MOSFET inhibidos en el convertidor, donde solo funcionan los diodos.

1.4.1.2. Freno regenerativo

La aplicación de imanes interpolares entre los polos del rotor, un mayor entrehierro, aire y una tensión elevada en un Alternador de imanes interpolares (IPM) con Polos de garra (CPA) es de hasta 100 kW de potencia máxima para la recuperación de energía del frenado del vehículo.

La figura 10 representa la red de alimentación de un vehículo propuesto para la recuperación de la energía de frenado, (Boldea, 2006). Esta red de alimentación incluye el CPA, una batería de iones de litio con cargas de alta tensión, una batería de plomo-ácido con cargas de baja tensión y dos convertidores DC-DC de cuadrante. Uno para conectar la red de 42 VDC y otro de 14 VDC para alimentar el circuito de excitación del alternador.

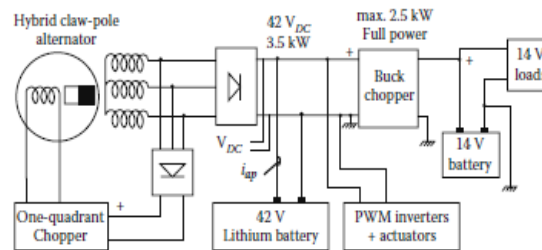


Fig. 10. Red de potencia del vehículo.

Fuente: (Boldea, 2006)

Según (Boldea, 2006) este modelo presenta la ventaja de que la estructura actual del bus de potencia para las cargas existentes ofrece una tensión mayor para los nuevos consumidores de alta potencia como los aires acondicionados y otros nuevos actuadores eléctricos. El convertidor de potencia alimenta solo las cargas de 14 VDC, por lo que su coste y nivel de potencia y pérdidas se reducen. El bus de 14 VCC experimenta menos influencia de la variación de la velocidad del motor y, en consecuencia, su nivel es más estable.

Si el SOC de la batería es inferior a la unidad, el bloque de gestión de la energía regula la corriente de excitación del alternador para extraer la máxima potencia. Lo cual es suficiente para reducir el consumo de combustible entre un 8% y un 10%. De esta forma se produce una potencia entre cero y la carga máxima requerida cuando el vehículo no está frenando (Boldea, 2006, pág. 233).

1.4.2. Funcionamiento de forma aislada

En este funcionamiento, el alternador síncrono suministra energía a una carga eléctrica por sí mismo. Además, la frecuencia puede ajustarse gracias al regulador de velocidad del motor,

que mueve el generador síncrono, mientras que el RMS de la tensión suministrada se regula mediante la regulación de la corriente del inductor. El nivel de carga no afecta a las cifras de potencia activa (P), reactiva (Q) y factor de potencia (fp), ya que dependen de la carga eléctrica conectada al alternador. Sus aspectos exteriores y de regulación son un reflejo de este método de funcionamiento (Rodríguez Pozueta, 2015).

La curva de la figura 11 representa la fluctuación de la tensión en el inducido causada por la corriente de este, mientras que el factor de potencia (fp) y la corriente de excitación son constantes.

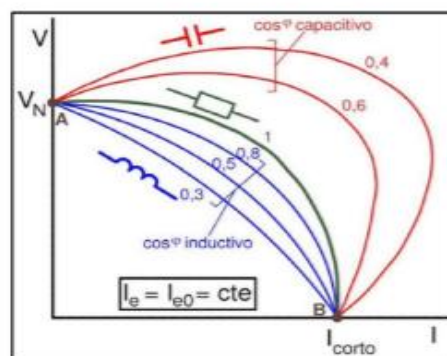


Fig. 11. Características exteriores.

Fuente: (Rodríguez Pozueta, 2015)

Las curvas de la figura 12 representan el comportamiento de un regulador de corriente de excitación para mantener una tensión de inducido constante, a pesar de que ello supone un cambio en el factor de potencia (fp.) y en la corriente.

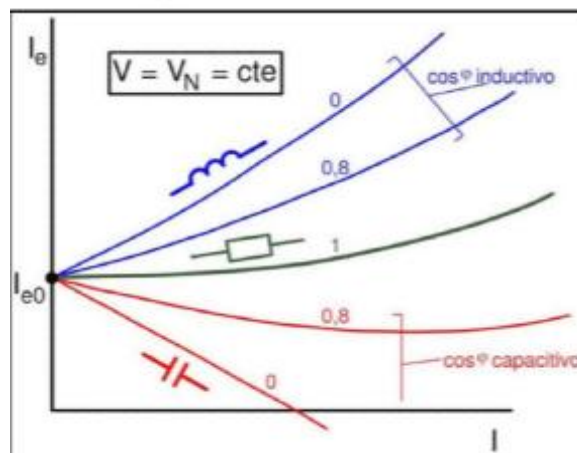


Fig. 12. Características de regulación.

Fuente: (Rodríguez Pozueta, 2015)

1.4.3. Funcionamiento en paralelo

Se conoce que la demanda de un SEP puede fluctuar significativamente durante el día, lo que hace necesario conectar y desconectar generadores. Es así como, en los sistemas de energía eléctrica, muchos generadores se conectan en paralelo, con el fin de suministrar la electricidad que necesita la carga.

En la figura 13 se tiene dos generadores para una carga, la conexión en paralelo de estos generadores se realiza a través de un interruptor. Por otro lado, la inclusión de generadores en el SEP es importante cuando es necesario dar potencia extra a una carga. El generador abierto en la conexión se verá afectado de forma negativa si el interruptor del generador vinculado se cierra (Valenzuela Santillán, 2013). Para la entrada de generadores en paralelo deben cumplirse los siguientes requisitos previos:

- a) a) La tensión del generador entrante debe coincidir con la tensión del otro generador.
- b) b) Los requisitos de frecuencia de los generadores deben cumplirse.
- c) d) La secuencia de los generadores debe coincidir.
- d) Debe tenerse en cuenta la igualdad de los ángulos de fase.

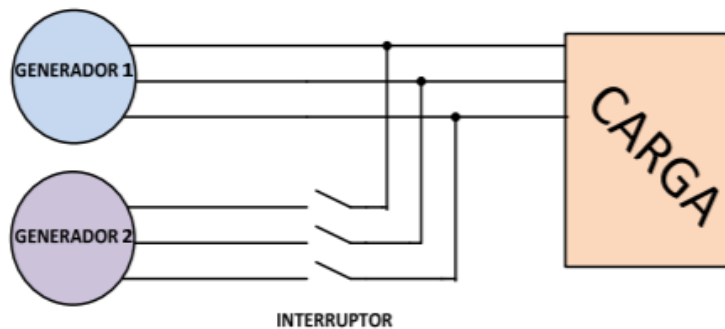


Fig. 13. Generadores conectados en paralelo.

Fuente: (Valenzuela Santillán, 2013)

1.4.4. Voltaje

Dado que una diferencia de tensión entre las fases provocaría un gran flujo de corriente que dañaría los generadores, las tensiones de línea (VLL) de los generadores deben ser las mismas. Por lo que, es necesario ajustar la corriente de campo para que los generadores tengan el mismo nivel de tensión.

1.4.5. Frecuencia

Para evitar los transitorios de potencia, que acortan la vida útil de las máquinas, el generador que se conecte debe tener la misma frecuencia que el sistema al que se va a conectar. La frecuencia del generador aumenta o disminuye como consecuencia de las variaciones de velocidad.

1.4.6. Secuencias de fase

En la Figura 14 se pueden observar dos secuencias de fases: una es la secuencia positiva o directa, donde el orden de los fasores aparece como ABC, y la otra es la secuencia inversa o negativa, donde el orden de los fasores aparece como ACB. En este sentido, la secuencia de fase se define por la aparición de los picos de tensión de cada una de las fases de un sistema de generación (Valenzuela Santillán, 2013).

Por otro lado, la secuencia de fases de los generadores en paralelo será diferente cuando entren por primera vez en la red, ya que dos de las tres fases de los generadores estarían desfasadas 120 grados, lo que provocaría una alta tensión diferencial y el fallo de ambas máquinas. Este problema puede solucionarse conmutando dos de las tres fases del generador (Valenzuela Santillán, 2013).

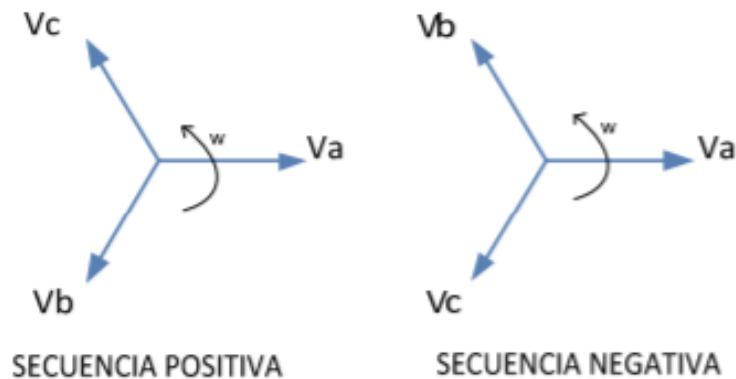


Fig. 14. Secuencia de fases.

Fuente: (Valenzuela Santillán, 2013)

1.4.7. Amplitud, frecuencia y ángulo de fase

La amplitud de la tensión, la frecuencia y el ángulo de fase deben controlarse cada vez que un generador se conecta a un sistema de energía. Cerrar un disyuntor de interconexión en el momento preciso donde las amplitudes de tensión (Fig. 15), las frecuencias (Fig. 16) y los ángulos de fase (Fig. 17) coinciden perfectamente no suele ser práctico. En su lugar, los sistemas se ponen en paralelo dentro de un margen de tolerancia aceptable para los desajustes de estas tres importantes magnitudes.

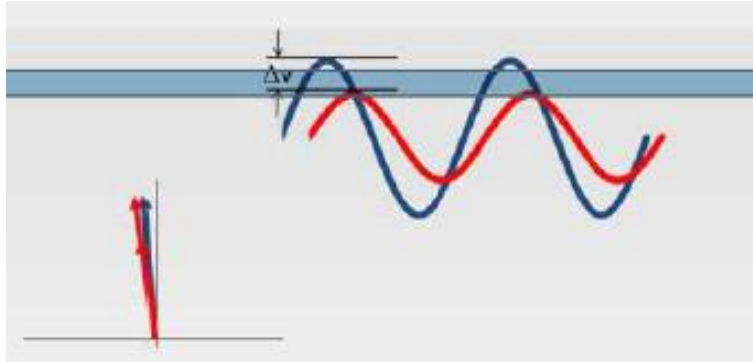


Fig. 15. Amplitud de tensión

Fuente: (Sajadi et al., 2022)

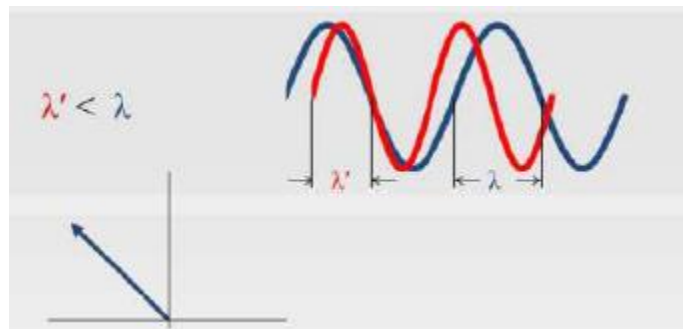


Fig. 16. Frecuencia del generador y del bus

Fuente: (Sajadi et al., 2022)

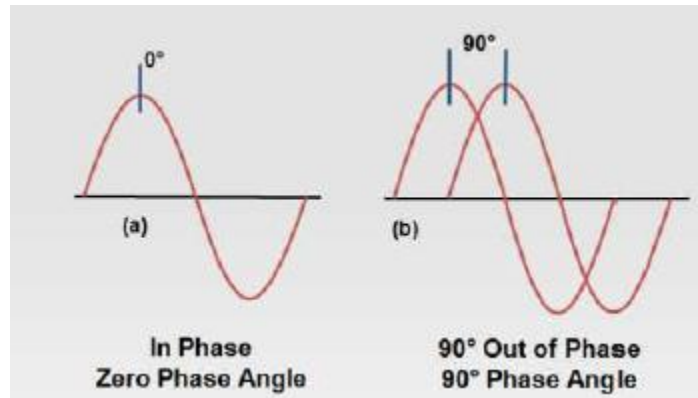


Fig. 17. Los ángulos de fase deben coincidir

Fuente: (Sajadi et al., 2022)

El término "ventana" describe los límites aceptables del desajuste de las magnitudes de sincronización en el mundo real. Si la salida de un generador que se aproxima está dentro de la ventana de amplitud de tensión, frecuencia y ángulo de fase, dos sistemas de potencia pueden ponerse en paralelo con pocas perturbaciones (Fig.18). Definir esta ventana de sincronización es esencial para dirigir la amplitud de tensión, la frecuencia y el ángulo de fase de un generador que se aproxima mediante métodos manuales o un sincronizador automático. También es esencial para configurar un relé de protección synccheck para controlar las condiciones y permitir la conexión de los dos sistemas.

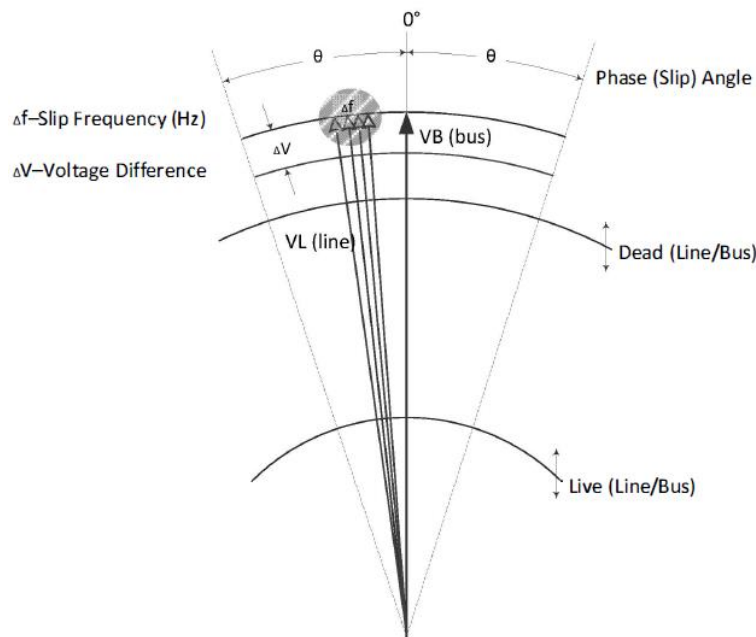


Fig. 18. Ventana de sincronización

Fuente: (Schaefer, 2016)

En la Figura 18, la ventana de sincronización muestra el objetivo de sincronización, la tensión del bus VB (bus), en el eje vertical. El generador que se aproxima es VL (línea), un fasor que barre en el sentido de las agujas del reloj. Los ajustes determinan Δv , que es la diferencia aceptable en la amplitud de la tensión. Los ajustes adicionales determinan los niveles de tensión para una línea y un bus muertos, así como para una línea y un bus vivos. Los ajustes también determinan la ventana de ángulo de fase aceptable (ángulo de deslizamiento θ) en grados y la frecuencia de deslizamiento aceptable Δf en hercios. La frecuencia de deslizamiento es la diferencia entre las frecuencias instantáneas de ambos sistemas de potencia, medida en hercios. Un rango de ajuste habitual para la frecuencia de deslizamiento es de 0,05 hertzios a 0,5 hertzios. La frecuencia de deslizamiento varía instantáneamente; la parte sombreada de la Fig. 18 representa el cambio rápido del fasor VL de la frecuencia de deslizamiento instantánea.

A medida que aumenta la salida del generador, la amplitud del fasor de tensión del generador (VL) aumenta hasta un nivel de tensión aceptable dictado por el ajuste de Δv . El control de velocidad del generador avanza y retrasa el ángulo (denotado por θ) de la diferencia entre VL y VB, hasta que la diferencia de ángulo cae dentro del rango aceptable. Además, un relé de comprobación de sincronización de ángulo de fase/frecuencia de deslizamiento compara la relación de fase instantánea de los dos fasores y permite o deniega una orden de acercamiento.

Un método más antiguo y menos preciso empleaba un enfoque de ángulo de fase/tiempo en el que un relé de comprobación de sincronización emitía un cierre al interruptor de interconexión dentro de la ventana, pero sin hacer coincidir las fases. Este método no tenía en cuenta la naturaleza dinámica y variable de la frecuencia de deslizamiento (la diferencia de velocidad del generador y, por tanto, la diferencia de frecuencia), que es fijada por el regulador de velocidad. El método de ángulo de fase/tiempo era válido para una frecuencia de deslizamiento determinada, por lo que los comandos de cierre del interruptor de interconexión eran demasiado tempranos o tardíos en función de la tasa de cambio de la frecuencia de deslizamiento.

1.4.8. Método de sincronización

Los transformadores de potencial (PT) en el lado del bus y en el lado de la fuente entrante (generador) del interruptor de circuito en paralelo suministran señales de tensión a dispositivos como contadores, lámparas, interruptores, relés de protección que indican y comparan las relaciones de tensión y ángulo de fase de cada fuente. La conmutación manual, la conmutación manual asistida y la conmutación automática son métodos de sincronización para cerrar el disyuntor de interconexión en el momento correcto. Cada método de conmutación tiene equipos e indicadores relacionados.

Un evento típico de sincronización comienza con la aplicación de suficiente excitación a un generador para bloquearlo en la operación sincrónica. Sin embargo, el generador no está listo para ponerse en paralelo con el bus de alimentación hasta que se cumplan los criterios de la ventana de sincronización. La amplitud de la tensión y el ángulo de fase del generador entrante deben ajustarse a la fuente existente.

Antes de que se produzca la conmutación, los operadores realizan ajustes manuales o un relé de sincronización realiza ajustes automáticos para dirigir la magnitud de la tensión y el ángulo de fase de la frecuencia para colocar la fuente del generador que se aproxima dentro de la ventana de sincronización. A continuación, el interruptor de interconexión se cierra en la ventana y el generador se conecta en paralelo al bus. Existen tres métodos para sincronizar la fuente con el bus: manual, manual asistido y control automático.

1.4.9. Sincronización manual

La sincronización manual la realiza el personal de explotación de la central eléctrica. Un operador ajusta los interruptores para controlar la excitación, la velocidad, la tensión y la frecuencia del generador. Cuando los fasores están dentro de la ventana de sincronización, un operador cierra el interruptor de interconexión para conectar el generador al bus de carga. Este tipo de esquema de sincronización es sencillo y económico. Los paneles de contadores de sincronización proporcionan a los operadores la información necesaria para la sincronización manual. Normalmente, los dispositivos de medición incluyen lo siguiente: sincroscopio (Figura 19); lámparas indicadoras; frecuencímetros del bus y del generador para la adaptación de la frecuencia; voltímetros de corriente alterna del bus y del generador para ajustar la tensión.



Fig. 19. Panel de sincronización

Fuente: (Schaefer, 2016)



Fig. 20. Sincroscopio

Fuente: (Schaefer, 2016)

Un sincroscopio que se visualiza en la figura 20 indica la tasa de deslizamiento (o tasa de frecuencia de deslizamiento) y la diferencia de ángulo de fase entre las tensiones del bus y del generador. La tasa de deslizamiento revela si la frecuencia del generador es menor (más lenta) o mayor (más rápida) que la frecuencia del bus. Un desajuste de la frecuencia se indica por la velocidad de rotación del puntero del dial. La diferencia de ángulo de fase se indica por la posición instantánea del puntero del dial. Una coincidencia de ángulo de fase de cero grados se indica cuando el puntero está en la posición de las doce en punto del dial. El objetivo de la sincronización es cerrar el disyuntor del generador/interconexión con un ángulo de fase de cero grados para minimizar los transitorios de flujo de energía y evitar daños en el generador cuando se cierra el disyuntor (Schaefer, 2016).

Un esquema básico para la sincronización consiste en lámparas incandescentes conectadas a las mismas fases a ambos lados del interruptor del generador, como se muestra en la Figura 21. Si las tensiones del generador y del bus están "en fase", no hay diferencia de potencial y las lámparas no se iluminan. Este método se conoce como sincronización de la "lámpara oscura".

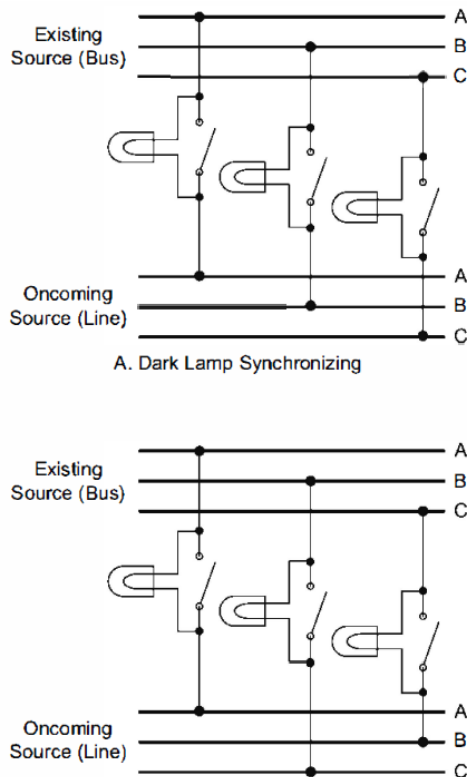


Fig. 21. Sincronización con lámparas incandescentes

Fuente: (Schaefer, 2016)

Otro método conocido como sincronización con "lámparas brillantes" utiliza lámparas iluminadas junto con una lámpara oscura. Haciendo ligeros ajustes en la velocidad de un generador que se aproxima, se puede igualar la frecuencia para que las lámparas de sincronización se enciendan y se apaguen al ritmo más lento posible. Cuando dos lámparas se encienden y una se apaga, se consigue la sincronización. Aunque sencillos, estos son métodos fiables de verificación de la sincronización. Pero, independientemente del método utilizado, es buena idea tener un interruptor de prueba de las lámparas para confirmar que éstas funcionan (Schaefer, 2016).

Los frecuencímetros y voltímetros proporcionan una representación numérica del estado de sincronización. Cuando los indicadores están conectados correctamente y están dentro de un rango aceptable, entonces las fuentes están sincronizadas.

En la práctica, para la sincronización manual, un operador crea una tasa de deslizamiento positivo muy lenta ajustando la velocidad del generador ligeramente más rápida que la frecuencia del bus. Esta tasa positiva hace que el generador recoja la carga de kW inmediatamente en lugar de tener el generador operando en una condición de motor cuando el interruptor de interconexión está cerrado. Normalmente, los generadores no funcionan en la condición de sub-excitación

después de que se cierre el interruptor del generador. Esto evita que el generador consuma valiosos Vars del sistema y evita que el generador se desincronice. El operador ajusta la tensión del generador ligeramente superior a la tensión del bus para que se exporte una pequeña cantidad de potencia reactiva desde el generador para superar la caída de tensión del transformador elevador del generador (GSI) después de que se cierre el disyuntor (Schaefer, 2016).

1.4.10. Operación de generadores en paralelo con grandes sistemas de potencia

La figura 22 ilustra un bus infinito, que describe un sistema de potencia muy grande donde la tensión y la frecuencia permanecen constantes independientemente de la cantidad de potencia real y reactiva que se suministre o demande. Esta situación se produce cuando un generador síncrono permanece conectado a un sistema de potencia porque el sistema de potencia es tan grande que ninguna de las acciones del operador del generador tendrá un gran impacto en el sistema de potencia.

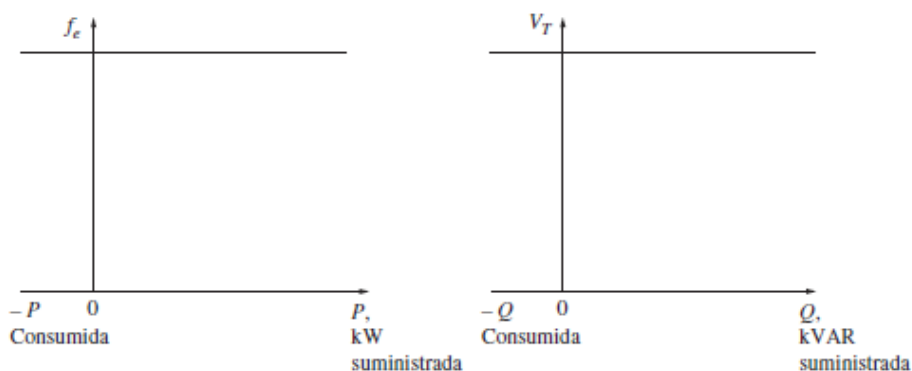


Fig. 22. Curvas de bus infinito.

Fuente: (Chapman, 1987)

Dado que los conductores de salida de las máquinas están interconectados, la frecuencia y la tensión en sus terminales deben coincidir en el momento en que un generador se conecta a otro en paralelo en un gran sistema. Como resultado, sus características de potencia real-frecuencia y potencia reactiva pueden mostrarse en un gráfico de espalda con un eje vertical compartido, que se conoce como diagrama casa y se ve en la figura 23.

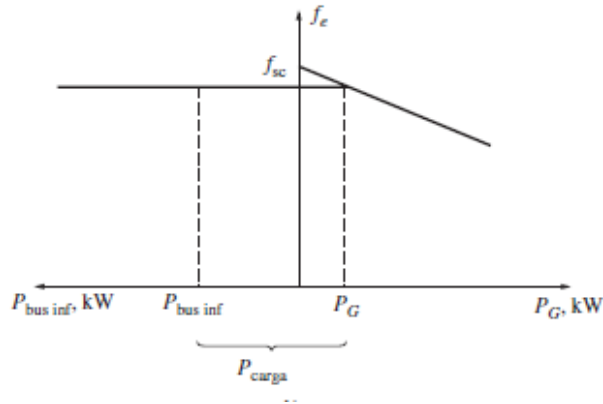


Fig. 23. Diagrama de casa de frecuencia contra potencia.

Fuente: (Chapman, 1987)

La figura 24 muestra Diagrama de casa de frecuencia contra potencia justo después de la conexión en paralelo del generador, cuando el generador se conecta recientemente en paralelo con el bus infinito este flotara en la línea y suministrara una pequeña cantidad de potencia real (P) y muy poca potencia reactiva.

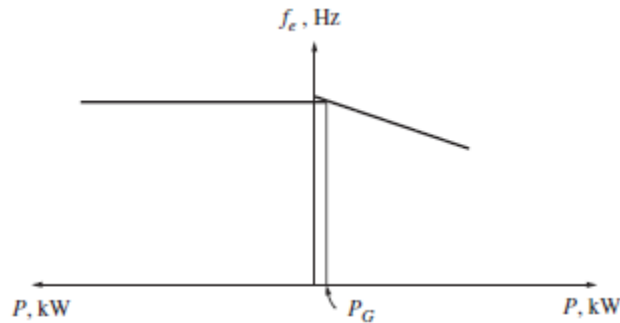


Fig. 24. Diagrama de casa de frecuencia contra potencia justo después de la conexión en paralelo.

Fuente: (Chapman, 1987)

En la figura 25 se tiene el diagrama de casa de frecuencia contra potencia en vacío del generador, cuando se completa la conexión en paralelo la frecuencia en vacío del generador es menor que la frecuencia de operación del sistema. A esta frecuencia, la potencia que suministra el generador es negativo, cuando la frecuencia en vacío del generador es menor que la frecuencia de operación del sistema, el generador en realidad consume potencia eléctrica y funciona como un motor.

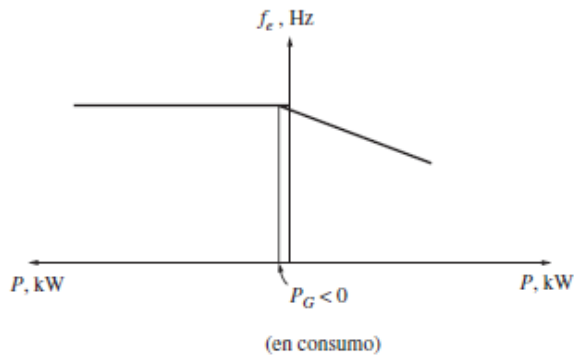


Fig. 25. Diagrama de casa de frecuencia contra potencia si la frecuencia en vacío del generador es un poco menor a la frecuencia del sistema antes de la conexión en paralelo.

Fuente: (Chapman, 1987)

1.4.11. Operación de generadores en paralelo con otros generadores del mismo tamaño

Las potencias reales y reactiva suministrada por un generador cuando este opera solo son fijas, estos valores serán iguales a la potencia demandada por el sistema. El generador al ser conectado en paralelo al bus infinito va a restringir el voltaje y la frecuencia porque estas son constantes, la potencia real y reactiva van a variar debido a los puntos de ajuste del mecanismo regulador y las corrientes de campo. Para este sistema la potencia real y reactiva P y Q demandada debe ser equivalente a la suma de las potencias real y reactiva que suministran los generadores. Además, se tiene que la frecuencia es constante.

En la figura 26 se puede observar el diagrama de casa de potencia-frecuencia de este sistema después de que el generador se conecta en paralelo con la línea.

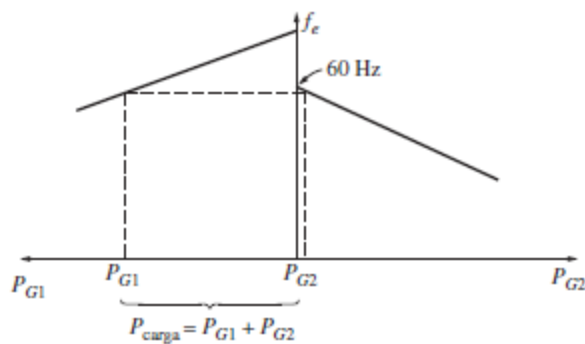


Fig. 26. Diagrama de casa de potencia-frecuencia del sistema después de que el generador se conecta en paralelo con la línea.

Fuente: (Chapman, 1987)

En la figura 27 se tiene el diagrama de casa en el momento en que el generador dos se conecta en paralelo con el sistema en donde:

- La potencia total de este sistema es igual a la potencia real del generador uno más la potencia real del generador dos.
- La potencia reactiva total es igual a la potencia reactiva del generador uno más la potencia reactiva del generador dos.
- Al incrementar los puntos de ajuste del mecanismo regulador del generador dos (G2), la curva de potencia-frecuencia de G2 se desplaza hacia arriba.

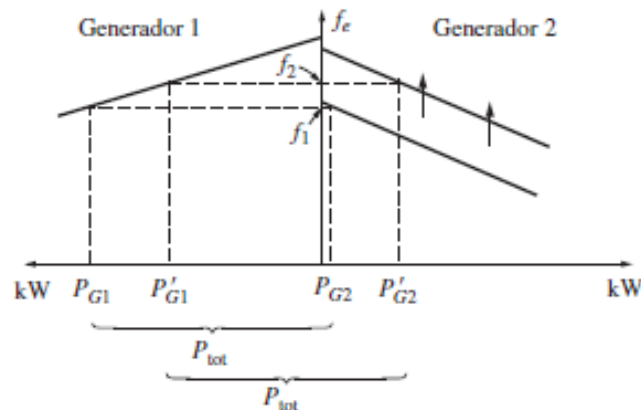


Fig. 27. Efecto en el sistema debido al incremento de los puntos de ajuste del mecanismo regulador del generador 2 en operación.

Fuente: (Chapman, 1987)

1.4.12. Curva de capacidad del generador síncrono

La figura 28 muestra el diagrama de capacidad de un generador síncrono el cual es la expresión gráfica de los límites que posee el estator y rotor o cualquier otro límite de este, este diagrama es la gráfica de la potencia compleja es igual a la potencia real más la potencia reactiva, esta fórmula es obtenida del diagrama fasorial del generador, dado el caso de que el voltaje de fase es constante. En la siguiente figura se observa el diagrama fasorial de un generador síncrono que opera con un factor de potencia en retraso y a voltaje nominal.

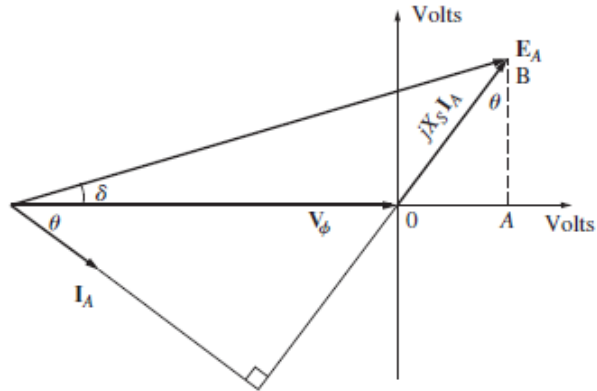


Fig. 28. Diagrama fasorial del generador.

Fuente: (Chapman, 1987)

“Se dibuja un grupo ortogonal de ejes en el diagrama con origen en la punta del voltaje de fase. En este diagrama, el segmento vertical AB tiene una longitud de $jX_s I_A \cos \theta$ y el segmento horizontal OA tiene una longitud de $jX_s I_A \sen \theta$.” (Chapman, 1987, pág. 207)

Capítulo II

Características de funcionamiento de un generador síncrono de polos de garra dentro de un Sistema Eléctrico de Potencia

En este capítulo se describe el funcionamiento del generador síncrono de polos de garras. También se mencionan las herramientas y materiales necesarios para la implementación que conforman el módulo de prueba. Del mismo modo, se describen las características de las herramientas y materiales imprescindibles para la construcción del módulo, permitiendo así el cumplimiento de los requisitos del proyecto.

El módulo en cuestión se implementa en la Universidad Técnica del Norte, campus universitario del Olivo situado en la Av. 17 de julio 5-21 y General José María Córdova. En el laboratorio de máquinas de la carrera de electricidad (CIELE).

El planteamiento para la elaboración del módulo de pruebas se basa en la creación de un plan para su ejecución. Por lo que, para completar el objetivo de este capítulo se proponen tres fases: Elaboración del diagrama del sistema; Importación de los materiales para el armado del sistema; y construcción del pequeño sistema eléctrico de potencia en el laboratorio de máquinas de carrera de electricidad.

1. Metodología

En la Figura 29 se aprecia el flujograma del proceso metodológico que se emplea como método para la presentación de todo el proceso del trabajo de grado. También se muestra el proceso para la obtención de datos como frecuencia, voltaje y corriente para culminar con el análisis y comparación de resultados con el módulo de laboratorio.

El proceso inicia con el análisis del funcionamiento de los generadores sincrónicos, con el fin de conocer todas las características técnicas relevantes, entre las que se enumeran la corriente del estator, la velocidad, la potencia eléctrica y el voltaje. Por otro lado, se describen las condiciones necesarias para que dos o más generadores sincrónicos operen en paralelo, lo cual servirá como base para definir el modelo de prueba para la conexión de dos generadores.

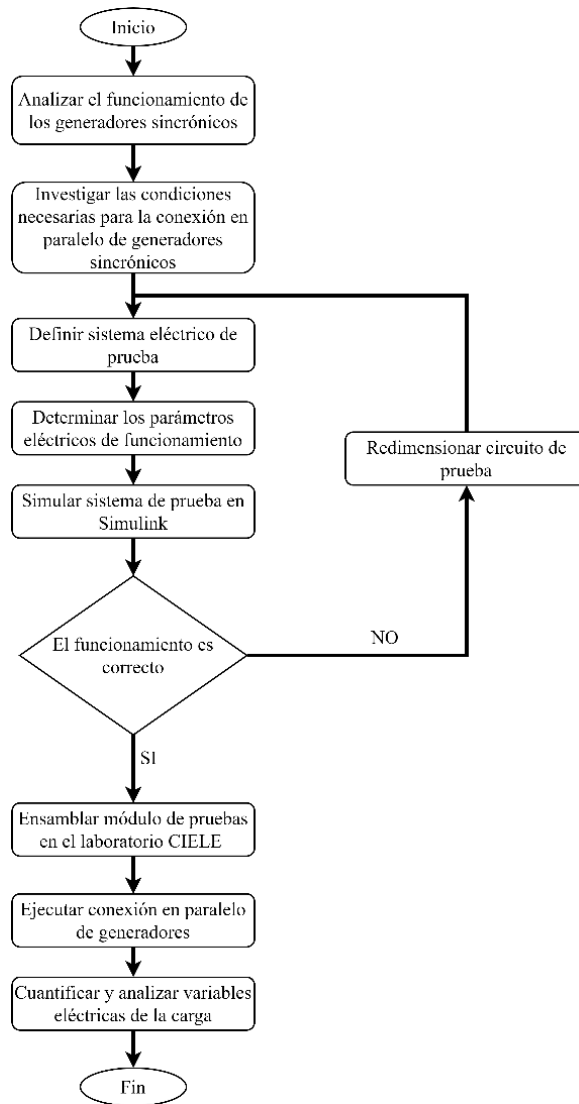


Fig. 29. Flujograma de proceso metodológico

Fuente: Autor

En contraste con los puntos antes descritos, se avanza en el desarrollo del diseño del módulo de pruebas con el fin de identificar los materiales que deben ser adquiridos para su posterior implementación.

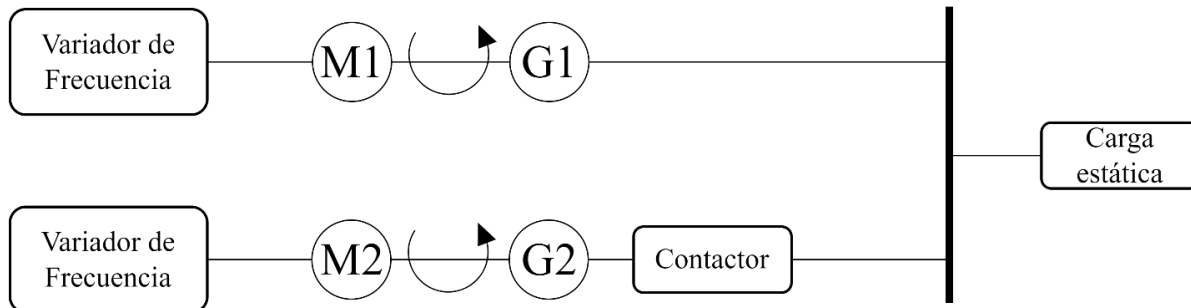


Fig. 30. Diagrama de bloques del pequeño sistema eléctrico de potencia

Fuente: Autor

Una vez definido el sistema de prueba se procede con la determinación de los parámetros eléctricos y de funcionamiento del modelo en cuestión. Para luego realizar una simulación en un software especializado (Simulink). De esta forma se valida y analiza la efectividad del sistema de prueba propuesto, así como su funcionamiento estimado en la vida real. Por consiguiente, si el sistema simulado funciona de forma correcta, se procede con la implementación del modelo en el laboratorio CIELE.

2. Sistema propuesto para la conexión de generadores sincrónicos en paralelo

En la mayoría de los países, la generación de la energía eléctrica se realiza generalmente desde diferentes centros geográficamente distantes entre sí y conectados en paralelo. La conexión de varias centrales de generación en paralelo se conoce como sistema de red interconectada. Así, cuando la demanda es mayor que la capacidad nominal de alguna central, el exceso de carga puede ser compartido por otras estaciones.

Una de las máquinas más importantes en las plantas de generación interconectadas son los generadores síncronos, que se utilizan para la conversión electromecánica de la energía. Por lo general existe más de un generador en las estaciones de generación. Esto se debe a que, si sólo se utiliza un generador y si no está funcionando casi a plena carga, será relativamente ineficaz. Sin embargo, con muchas máquinas, es posible aumentar la eficiencia del sistema. Además, el disponer de muchos generadores funcionando en paralelo permite retirar uno o varios de ellos para su parada y mantenimiento preventivo.

El proceso de paralelización como el de reparto de cargas son operaciones cruciales para los generadores y, por lo tanto, ambos controles necesitan controladores de alta velocidad y precisión. De lo contrario, pueden producirse situaciones no deseadas y peligrosas como

sobrecargas, problemas de respuesta a la demanda debido a una reacción inadecuada a la demanda de energía, reducción de la frecuencia del sistema y colapsos de tensión.

Por consiguiente, se propone un sistema de potencia simple (Figura 31), el cual consta de dos fuentes de generación trifásicas, una conectada de forma permanente, mientras que la segunda se conmuta mediante un seccionador de potencia. En este sentido, los generadores síncronos se modelan mediante su modelo equivalente, mientras que la carga consta de dos bancos de resistencias y un conjunto de capacitancias, donde la configuración de cada grupo es Y.

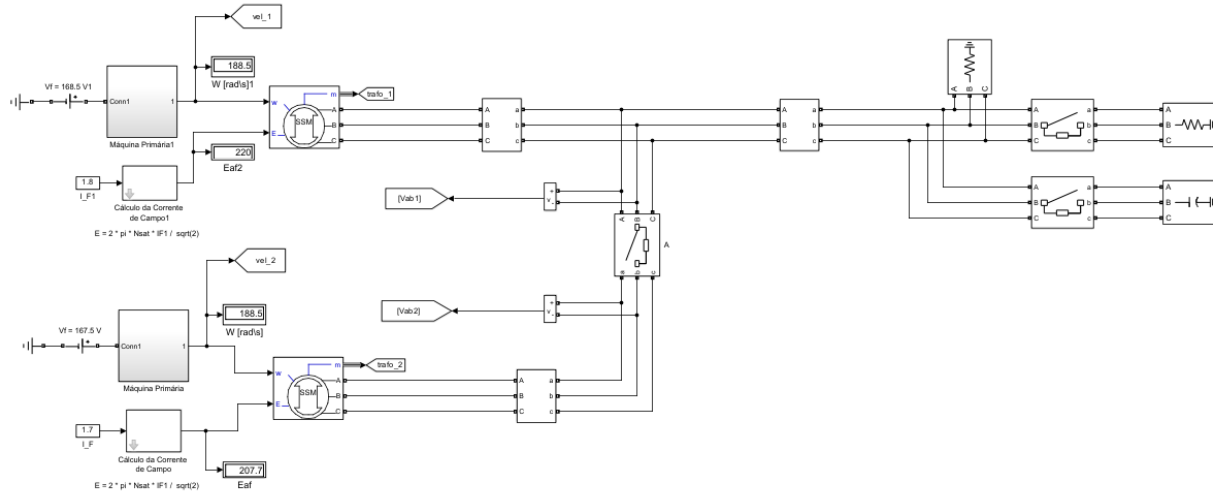


Fig. 31. Sistema de prueba para conexión en paralelo

Fuente: Autor

Por consiguiente, es preciso analizar las gráficas resultantes de la simulación para la puesta en paralelo de los generadores síncronos de polos de garras. La Figura 32 muestra el comportamiento del voltaje a lo largo del tiempo de simulación, mientras que en la Figura 33 se detalla la frecuencia de los dos grupos motor-generator.

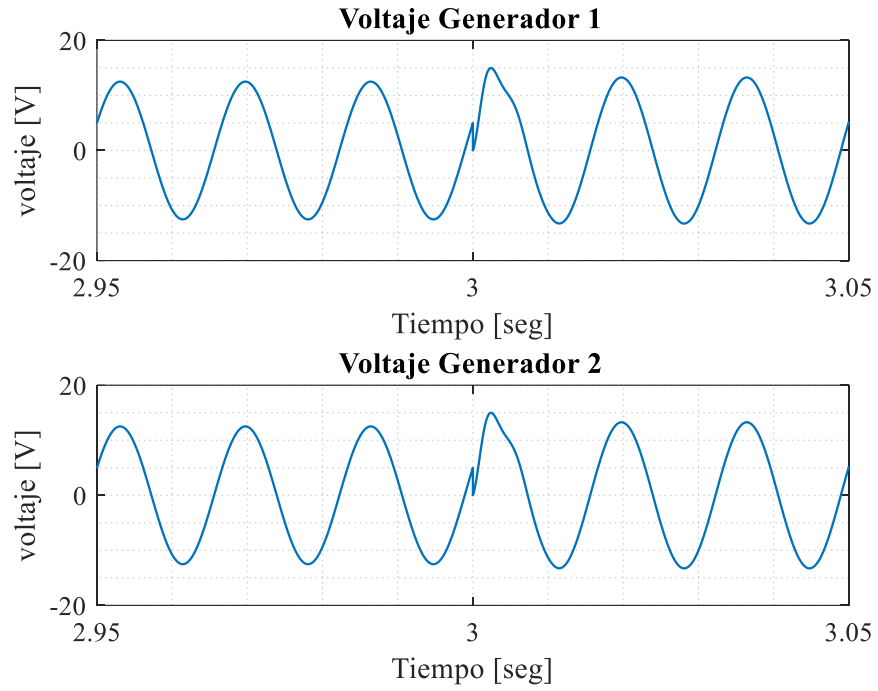


Fig. 32. Voltajes de sincronización

Fuente: Autor

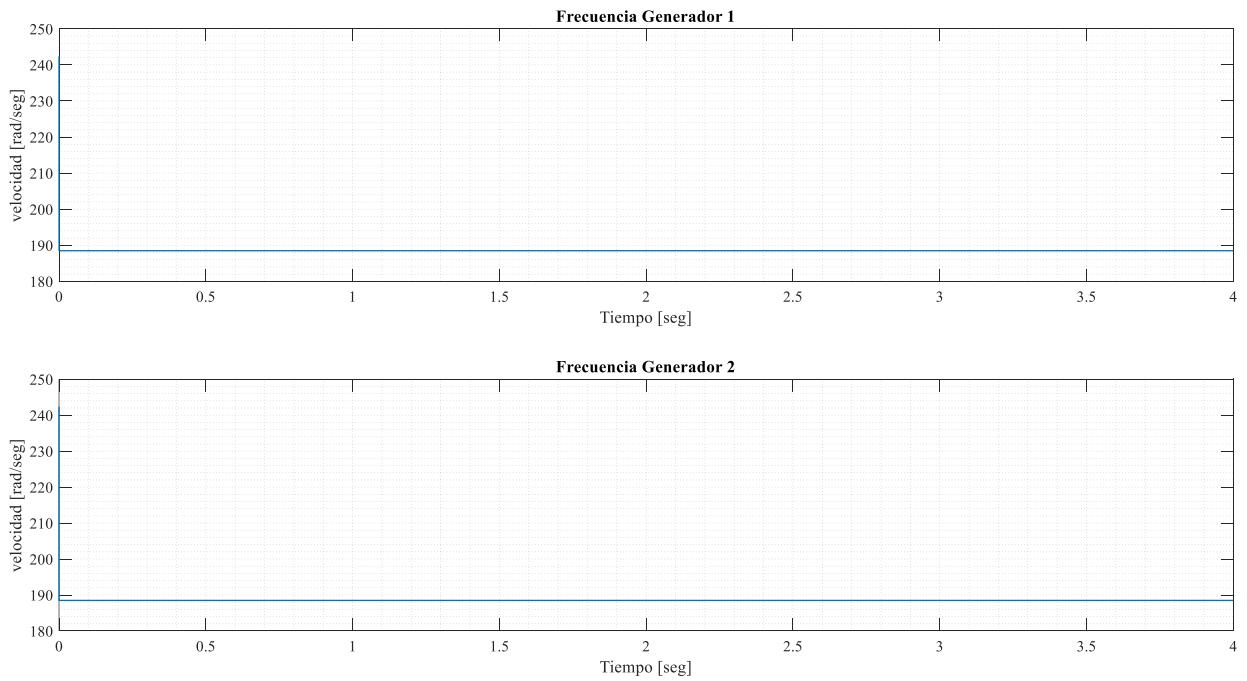


Fig. 33. Frecuencia de sincronización

Fuente: Autor

En la Figura 32 se evidencia que la amplitud de voltaje en cada generador inicia con 12 V. En este sentido es importante recalcar que el generador 1 empieza con la carga resistiva conectada en estrella, mientras que el generador 2 empieza en vacío. A los 1 segundos se conmuta una segunda carga resistiva, por lo que se observa que el voltaje del generador 1 reduce ligeramente su amplitud, no obstante, la variación no es significativa. Además, a los 2 segundos se constata que la magnitud de los voltajes tanto del generador 1 como el generador 2 poseen la misma amplitud, asimismo, la frecuencia de sincronización se ubica en 195 en ambos generadores, por lo tanto, el generador 2 se conecta en paralelo al primero. A partir del segundo 2 se observa que el voltaje del generador 1 se mantiene y estabiliza, hasta el ingreso de una carga de naturaleza capacitiva en el segundo 3. Esto genera un ligero aumento de la tensión en ambos generadores.

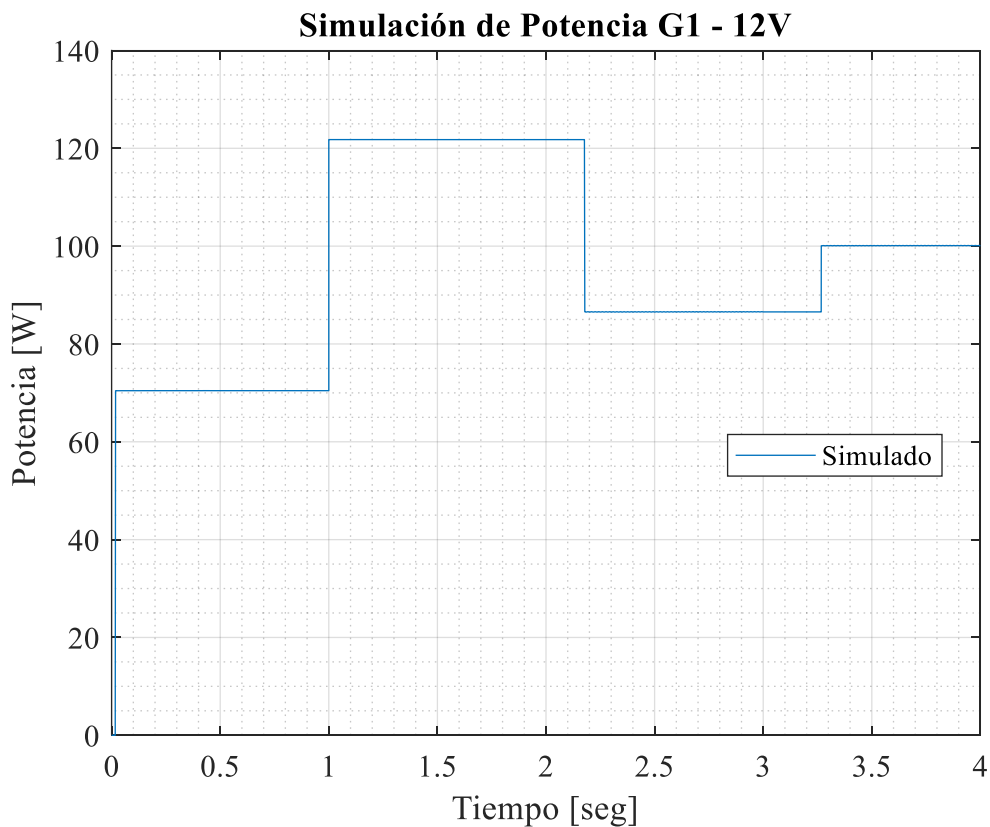


Fig. 34. Potencia del generador 1

Fuente: Autor

En la Figura 34 se evidencia que la potencia activa en el generador 1 inicia con valor de 70W. Al segundo 1, que se conmuta una segunda carga resistiva, existe un despacho mayor de

potencia (120W) por parte del generador 1. No obstante, al segundo 2 cuando el generador 2 se conecta a la red existe una repartición de carga, puesto que el generador uno empieza a despachar 90 W. Asimismo, cuando se conecta la carga capacitiva (3 segundos), el generador 1 despacha 100W.

En la Figura 35 se evidencia que la potencia activa en el generador 2 inicia con valor de 0 W, al igual que la potencia reactiva. Este estado se mantiene hasta la conexión en paralelo del generador a la red. Lo cual sucede en el segundo 3. En este instante el generador 2 empieza a despachar 22W. Asimismo, cuando se conecta la carga capacitiva (3 segundos), el generador 2 despacha 55.

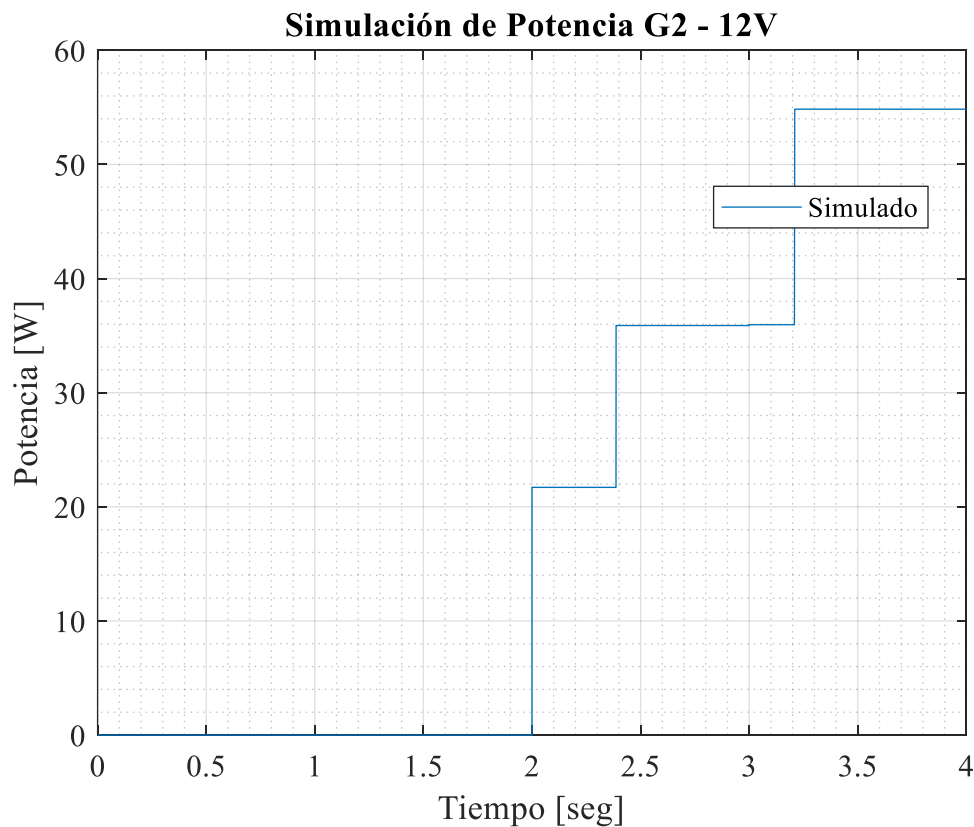


Fig. 35. Potencia del generador 2

Fuente: Autor

2.1. Modelación de dispositivos para conexión en paralelo

Los generadores síncronos convierten la energía mecánica en energía eléctrica. Como motor principal, la fuente de energía mecánica puede ser una turbina de vapor, un motor diésel,

una turbina de agua o una turbina eólica. La mayoría de los sistemas de energía se alimentan de varias máquinas de este tipo que funcionan en paralelo, y los propios sistemas están interconectados a la energía.

2.1.1. Circuito equivalente de un generador síncrono

El circuito equivalente monofásico de un generador síncrono se muestra en la Figura 37. En su descripción más simple, cuando el rotor comienza a girar y una corriente de excitación fluye a través de los devanados del rotor, el generador comenzará a generar la tensión. La tensión inducida se puede calcular mediante la siguiente expresión (Illesca, 2019):

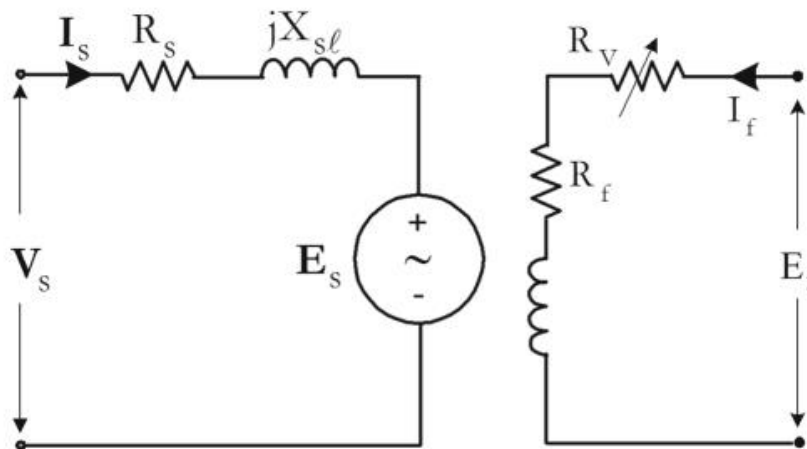


Fig. 36. Modelo equivalente de generador síncrono

Fuente: (Illesca, 2019)

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = N * \frac{d\varphi}{dt}$$

Donde e es la tensión inducida en los devanados del estator expresada en voltios, N es el número de vueltas de la bobina, Φ es la cantidad de flujo que atraviesa los devanados de la bobina (Wb), y φ es la cantidad de flujo magnético que varía en función del ángulo (Wb) (Illesca, 2019). Por otro lado, el valor eficaz de la tensión inducida (E_{rms}) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$E_{rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} * f_e * N * \Phi_{max}$$

Donde Φ_{max} es el valor máximo del flujo (Wb) y N es la frecuencia angular (rad/s). Asimismo, la frecuencia de la energía producida se determina mediante la siguiente ecuación.

$$f_e = \frac{n_m * P}{120} \text{ (Hz)}$$

Donde f_e es la frecuencia eléctrica (Hz), n_m es la velocidad del rotor de la máquina (rpm), y P es el número de polos. Por otro lado, la amplitud de la tensión generada varía en función de la velocidad de giro y del campo magnético producido por la corriente de excitación. Además, la potencia, que se transferirá a la carga, se determina según la siguiente expresión (Schaefer, 2016).

$$P_m = \omega_s T_m$$

Donde P_m es la potencia mecánica aplicada al eje del generador, ω_s es la velocidad angular y T_m es el par producido (Guler & Irmak, 2017).

2.1.2. Diseño eléctrico de módulo de sincronización de generadores de polos de garra

En esta sección se presenta el diseño completo para la implementación del módulo de sincronización para los generadores síncronos de garras. Los esquemas de control y potencia, junto con la conexión progresiva de la carga resistiva y capacitiva, se desarrollan para la puesta en paralelo de los generadores. También se dimensionan los conductores, los contactores de línea y la estructura del tablero.

2.2. Preparación del tablero de prueba

El módulo de 4 fases para el análisis del método de sincronización propuesto de generadores síncronos de polos de garra se presenta en la Tabla 3. La primera etapa es el arranque del primer grupo motor-generador junto con una carga resistiva dispuesta en estrella durante 10 segundos o hasta que el sistema se estabilice. La siguiente etapa incluye la unión de una segunda carga resistiva en configuración de estrella en paralelo con la primera durante 10 segundos, o hasta que el sistema se estabilice. En la tercera etapa se realiza una conexión en paralelo entre los dos generadores de polos de garra. En la cuarta etapa, se conmuta un banco de capacitancias, que se conectan en estrella, en paralelo a la primera y segunda carga.

Tabla 1 Etapas de funcionamiento de módulo de pruebas

Etapa	Motor-	Motor-	Cargas			Tiempo de funcionamiento
	Generador 1	Generador 2	Estrella resistiva	Estrella resistiva	Estrella capacitiva	
1	X		X			10 seg
2	X		X	X		10 seg
3	X	X	X	X		10 seg
4	X	X	X	X	X	10 seg

Fuente: Autor

El diagrama de fuerza que se propone para el análisis del método de sincronización de generadores síncronos de polos de garra se presenta en la Figura 38. En este se observa que los motores M1, M2, G1 y G2 representan a los grupos motor-generator. Asimismo, la carga R1 corresponden a las resistencias R1, R2, R3 conectadas en estrella, la carga R2 corresponde a las resistencias R4, R5, R6 conectadas en estrella, mientras que los capacitores X1, X2 y X3 se asocian con las cargas de capacitancia. Además, en la Figura 39 se presenta el diagrama de control que comanda el diagrama de fuerza de la Figura 38.

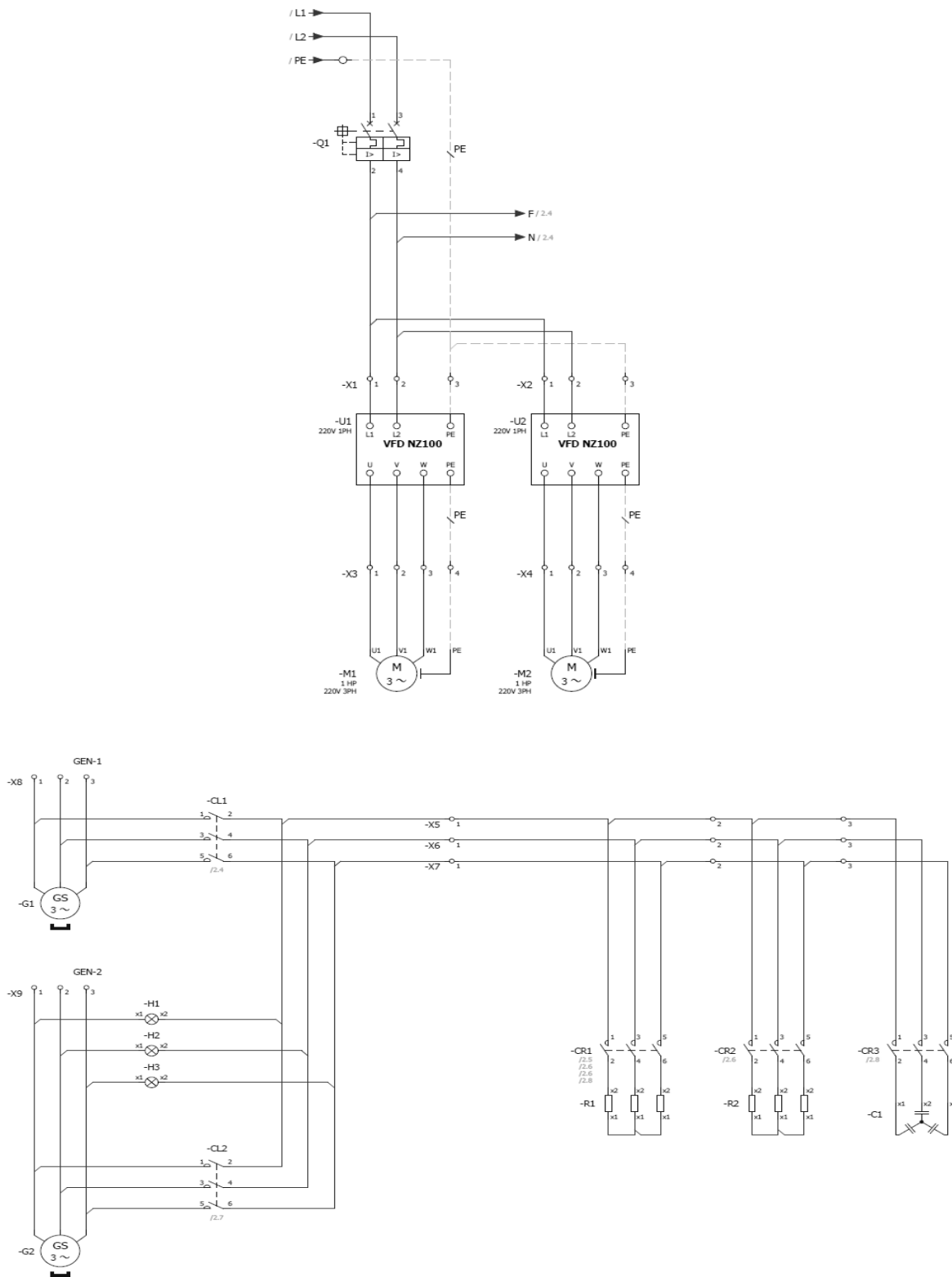


Fig. 37. Diagrama de fuerza para sincronización de generadores

Fuente: Autor

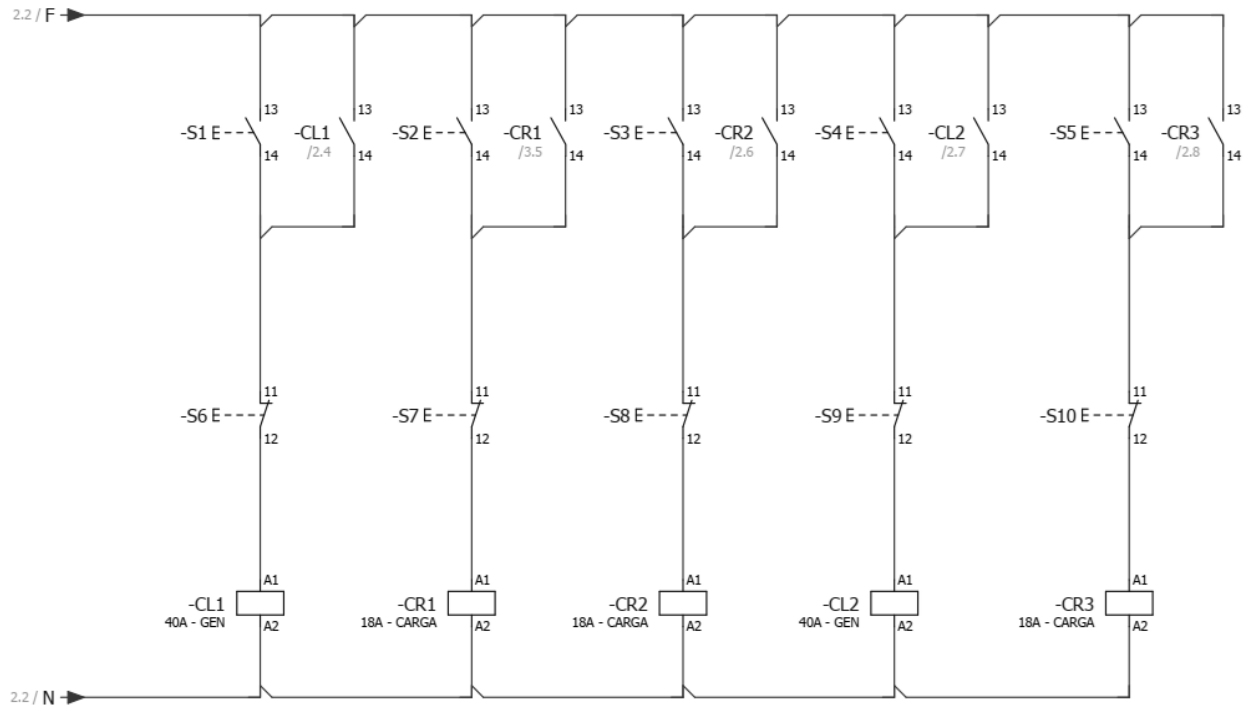


Fig. 38. Diagrama de control para sincronización de generadores

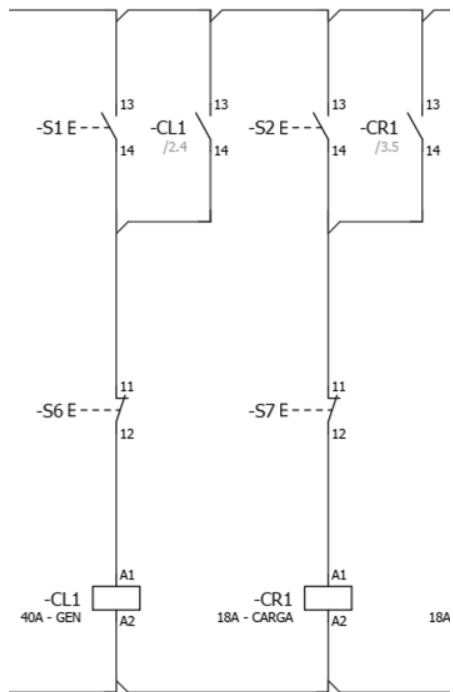
Fuente: Autor

El diagrama de control descrito en la Figura 39 consta de 4 pulsadores S1, S2, S3 y S4 que controlan los grupos motor-generador (S1 y S3), las cargas resistivas (S1 y S2) y la carga capacitiva (S4).

2.2.1. Etapa 1 funcionamiento un grupo motor generador y una carga resistiva

En esta etapa se pone en marcha el variador de velocidad U1 el cual activa el motor M1 y este hace funcionar al generador G1, el grupo motor-generador se comanda por un pulsador S1, puesto que este activa la bobina CL1 cuyos contactos activan el contacto de CL1 y hace entrar al generador G1 al sistema. Por otro lado, mediante un pulsante S2 se activa la bobina CR1 donde sus contactos activan la carga R1 conectada en estrella (Figura 40). Además, las bobinas CL1 y CR1 se pueden desactivar mediante los pulsadores normalmente cerrados S6 y S7 respectivamente. Este modo de funcionamiento se mantiene hasta que el sistema se estabilice, lo cual se podrá determinar mediante los medidores de energía dispuestos en paralelo a la carga.

CIRCUITO DE CONTROL



CIRCUITO DE FUERZA

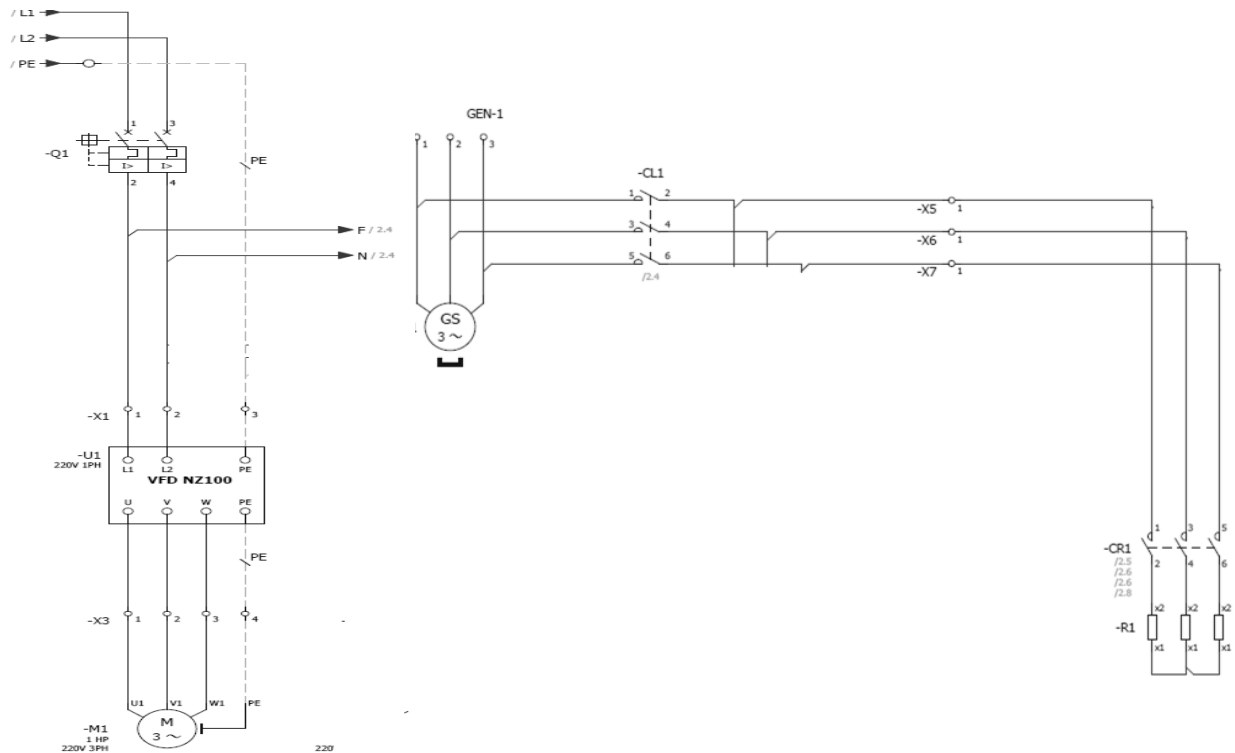


Fig. 39. Etapa 1 de tablero de sincronización de generadores

Fuente: Autor

2.2.2. Etapa 2 adición de una carga resistiva

En esta etapa se añade una segunda carga resistiva R2 conectada en estrella al sistema de la etapa 1, que se representa por R2 en el circuito de fuerza. En este sentido, la conmutación de la carga se comanda por un pulsador S2, puesto que este activa la bobina CR2 cuyos contactos activan el grupo antes mencionado (Figura 41). Además, la bobina CR2 se puede desactivar en cualquier momento mediante el pulsador S8. Este modo de funcionamiento se mantiene hasta que el sistema se estabilice, lo cual se podrá determinar mediante los medidores de energía dispuestos en paralelo a la carga.

CIRCUITO DE CONTROL

CIRCUITO DE FUERZA

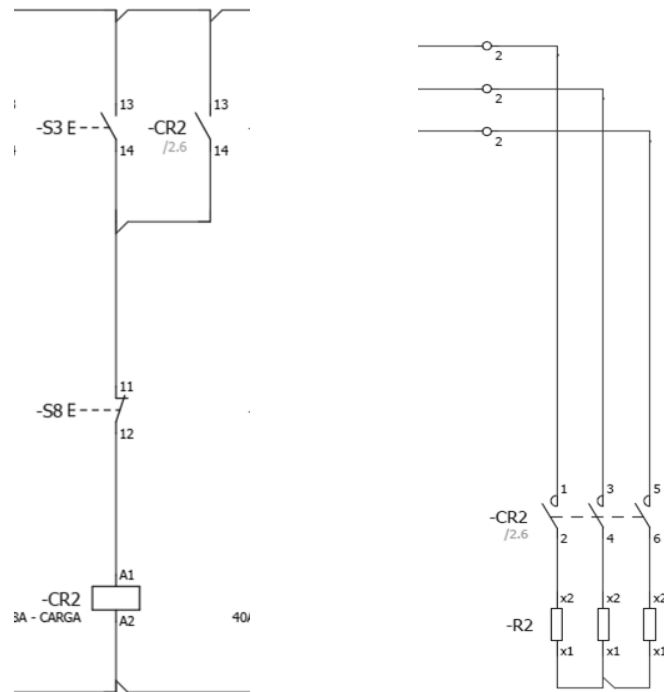


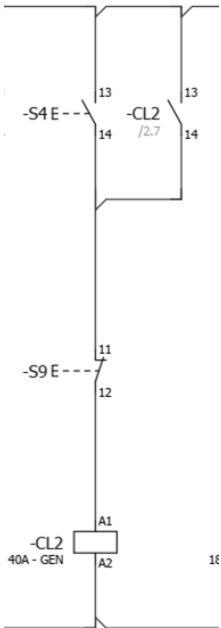
Fig. 40. Etapa 2 de tablero de sincronización de generadores

Fuente: Autor

2.2.3. Fase 3 puesta en paralelo de generadores síncrono de polos de garra

En esta etapa se pone en marcha el variador de velocidad U2 el cual activa el motor M2 y este hace funcionar al generador G2. En este sentido, la entrada al sistema de la etapa 2 del grupo motor-generador se comanda por un pulsador S4, puesto que este activa la bobina CL2 cuyos contactos activan el grupo antes mencionado de forma paralela (Figura 42). Además, el pulsador S9 permite detener la bobina CL2 en cualquier momento. Este modo de funcionamiento se mantiene hasta que el sistema se estabilice, lo cual se podrá determinar mediante los medidores de energía dispuestos en paralelo a la carga.

CIRCUITO DE CONTROL



CIRCUITO DE FUERZA

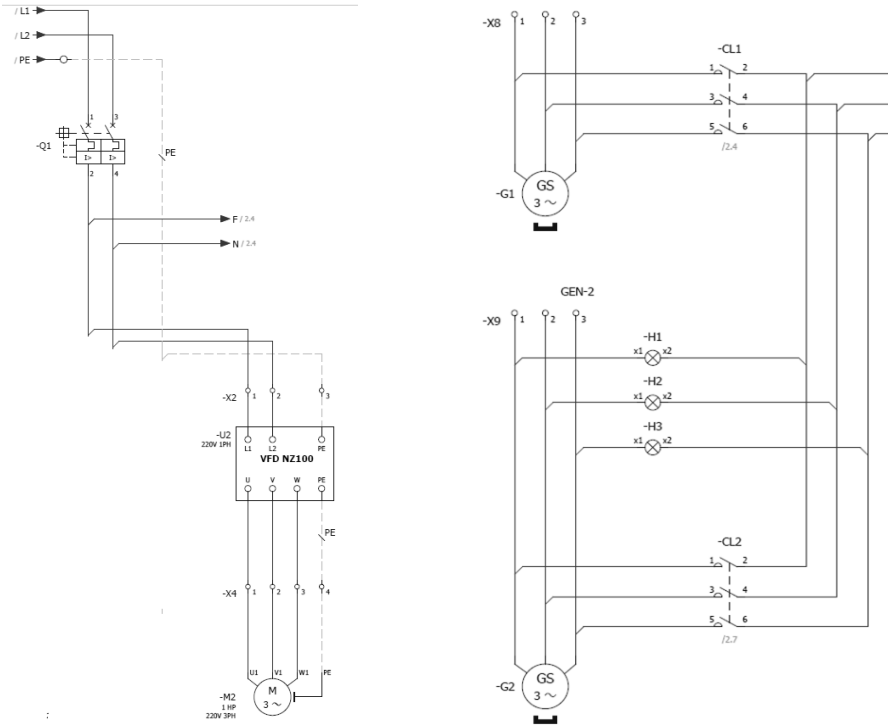


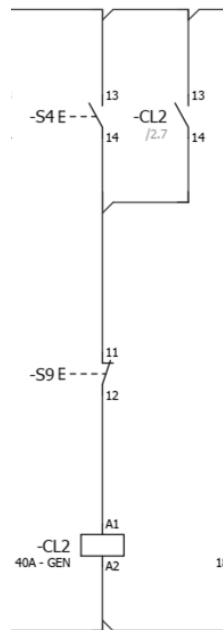
Fig. 41. Etapa 3 de tablero de sincronización de generadores

Fuente: Autor

2.2.4. Etapa 4 adición de una carga capacitiva

En esta etapa se añade una tercera carga de origen capacitivo conectada en estrella al sistema de la etapa 3, que se representa por C1 en el circuito de fuerza. En este sentido, la conmutación de la carga se comanda por un pulsador S4, puesto que este activa la bobina CR3 cuyos contactos activan el grupo antes mencionado (Figura 43). Además, el pulsador S9 permite desactivar la bobina CR3 en cualquier instante. Este modo de funcionamiento se mantiene hasta que el sistema se estabilice, lo cual se podrá determinar mediante los medidores de energía dispuestos en paralelo a la carga.

CIRCUITO DE CONTROL



CIRCUITO DE FUERZA

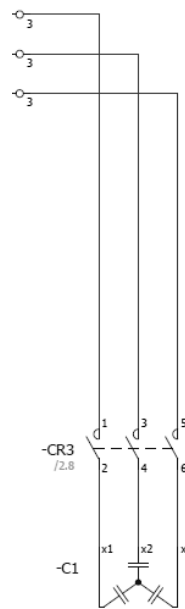


Fig. 42. Etapa 4 de tablero de sincronización de generadores

Fuente: Autor

2.3. Dimensionamiento de elementos

El dimensionamiento de los componentes en el circuito de potencia debe llevarse a cabo para analizar la técnica de sincronización de los generadores síncronos con polos de garra como se mencionó anteriormente. Esto es extremadamente importante ya que el uso de contactores incorrectos podría dañar equipos delicados, como el grupo motor-generator e inversores de frecuencia.

Por otro lado, la magnitud de los contactores está determinado por la potencia del generador, el factor de potencia, el nivel de voltaje y la corriente nominal. En este estudio se emplea un motor Siemens (Tabla 2) y un generador Mitsubishi (Tabla 3).

Tabla 2 Características del motor

Tipo	Potencia		In		Factor de potencia	Velocidad nominal
	HP	kW	220 V	440 V		
			A	A	cos ϕ	rpm
1LA7 073-2AY60	1	0,7457	3,5	1,75	0,89	3320

Fuente: Autor

Tabla 3 Características del generador

Tipo	Corriente de carga (A)	Tensión (V)
0605-18-300A	35	12

Fuente: Autor

La corriente del interruptor térmico se determina después de tener en cuenta las características del motor y generador, multiplicando la corriente nominal (I_n) de funcionamiento por 1,2, como se indica a continuación.

$$I_T = I_n * 1.2$$

Por lo tanto, al sustituir los números se obtiene $I_T = 3.5 * 1.2$ o 4,2 A, como corriente del disyuntor termomagnético. Esto sugiere que se necesita un disyuntor termomagnético de 5 A. Por otro lado, para calcular la dimensión de los contactores de línea se emplea la corriente nominal del alternador, donde $I_{TL} = 35 * 1.2$ dando como resultado 42 A. Por último, el conductor de línea se dimensiona utilizando la siguiente ecuación.

$$SL = \frac{I_G}{3}$$

Por consiguiente, SL se refiere a la sección del conductor en milímetros cuadrado, mientras I_G es la corriente nominal del alternador expresada en amperios. Con lo anterior se obtiene que $SL = 35/3$ o 11.66 milímetros cuadrados, lo que se asocia a un calibre AWG # 6. Por

otro lado, el conductor para el motor es de $SM = 3.5/3$ o 1.16 milímetros cuadrados, lo que implica un calibre AWG # 12.

2.4. Materiales y software

Los equipos y materiales necesarios para la construcción del módulo de sincronización de generadores síncronos de polos de garras se eligen según el sistema eléctrico de potencia. Asimismo, para garantizar el funcionamiento del módulo y la recolección de datos, se debe establecer el modelo físico del sistema (Tabla 4). Se ha utilizado el programa matlab para el desarrollo del código con el cual tiene la función de recibir los datos obtenidos por medidor PZEM004T y poder guardarlos en un archivo de excel. Además se empleó la herramienta de simulink que viene incluida en el mismo programa, con esta herramienta se ha elaborado la simulación del pequeño sistema eléctrico de potencia.

Tabla 4 Equipos y materiales para el módulo de pruebas de funcionamiento del generador *síncrono*

Componente	Cantidad	Modelo
Variador de frecuencia	2	CFW100
Motor	2	-
Generador síncrono	2	-
Contactador eléctrico	2	Din Cjx2 1810
Medidor de energía	1	Pzem-004
Resistencia eléctrica	6	-

Fuente: Autor

2.4.1. Generadores síncronos

Para la implementación del módulo se emplearon dos generadores síncronos de dos polos, de la marca SIEMENS. Ambos poseen las mismas características que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 5 Características de los generadores síncronos

Características eléctricas	
Voltaje de salida	220 YY/ 440 Y

Potencia de suministro	de	0.75KW
Velocidad síncrona		3320 rpm
Numero de polos		2p

Fuente: Autor

2.4.2. Motor de inducción jaula de ardilla

Se eligió un motor de inducción de jaula de ardilla con una tensión de trabajo de 200/380V y 1720 rpm de la marca Siemens. En este sentido, el motor primario mueve el generador sincrónico conectando los dos ejes horizontales (Figura 44).

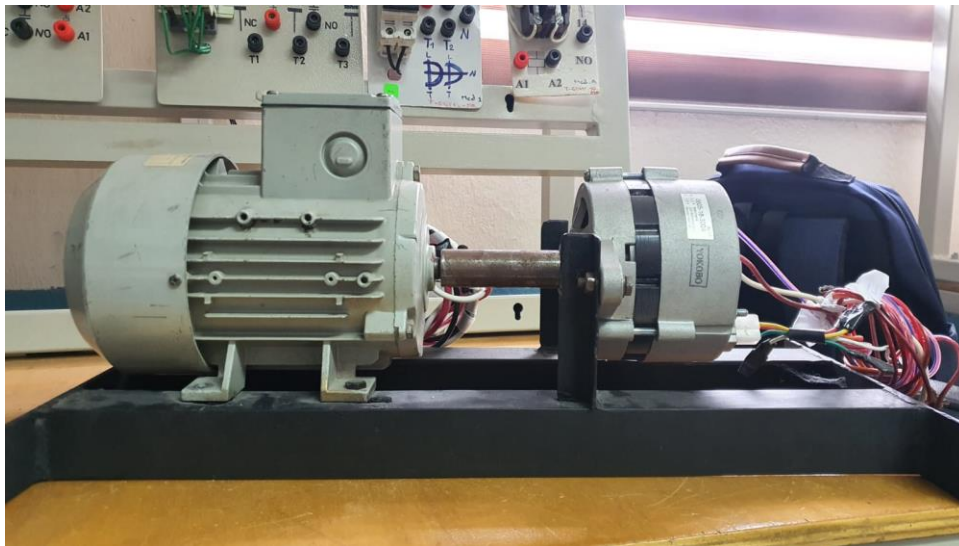


Fig. 43. Motor primario

Fuente: Autor

2.4.3. Variador de velocidad

Se utilizó un variador de frecuencia ZONCN NZ100 (Figura 45) para el control del motor, este tipo de variador es empleado para controlar motores de inducción trifásicos con una corriente nominal de salida que va desde 1,6 - 7,3 A, potencia nominal de salida de 0,18-1,5 kW / 0,25-3,0 HP y voltaje nominal de 200-240 V.



Fig. 44. Variador de velocidad ZONCN NZ100

Fuente: Autor

2.4.4. Contactor eléctrico

Cuando el generador está en marcha, el circuito se cierra y se acopla al bus infinito mediante contactores Din Cjx2 1810 (Figura 46), que tienen características de tensión de hasta 360V, una corriente nominal de hasta 18 y una bobina de enclavamiento de 120V.

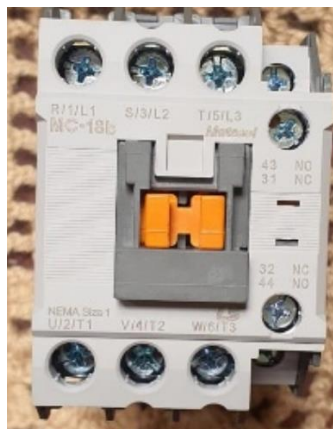


Fig. 45. Contactor Din Cjx2 1810

Fuente: Autor

2.4.5. Medidor de energía

Se ha utilizado un medidor digital con pantalla LCD PZEM-004 con una tensión de trabajo de 80-260V y una corriente máxima de 100A para medir las magnitudes de tensión, corriente y potencia proporcionadas por el módulo implementado.

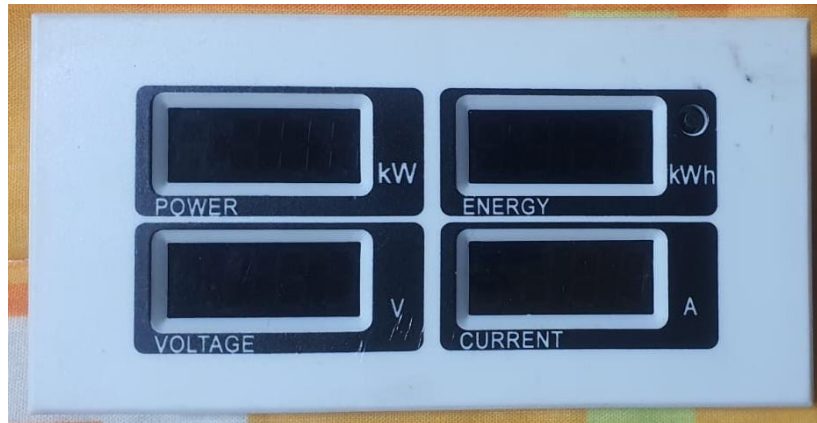


Fig. 46. Medidor PZEM-004 Pantalla LCD Digital

Fuente: Autor

2.4.6. Cargas eléctricas

En el sistema eléctrico de potencia propuesto se emplea un banco de 3 cargas resistivas de 10 Ohmios y 100 W. Esta es una resistencia de potencia ajustable, montaje en chasis y dimensiones 19.00mm x 12.70mm.



Fig. 47. Carga resistiva

Fuente: Autor

2.5. Diseño mecánico de módulo

El diseño físico del módulo de sincronización de generadores síncronos de polos de garras se creó con el programa AutoCAD, utilizando medidas reales de los elementos. Por consiguiente, la Figura 49 muestra el diseño estructural del sistema de generación utilizando los materiales esenciales.

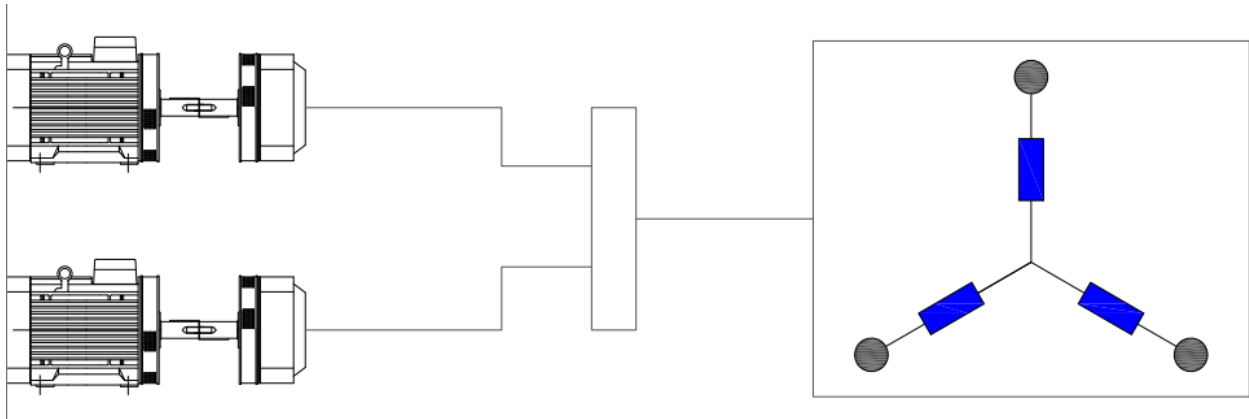


Fig. 48. Módulo de sincronización de generadores síncronos de polos de garras

Fuente: Autor

Los elementos se disponen sobre una estructura, donde se aseguran las partes mecánicas de cada elemento. Además, en cada grupo motor-generator se unen mediante un acople mordaza, asimismo, la conexión eléctrica de cada dispositivo se ubica en un panel de control que se sitúa en un costado de la estructura.

2.6. Estructura metálica del módulo

Debido a la necesidad de que el módulo de sincronización de generadores síncronos de polos de garras permanezca nivelado y de reducir las vibraciones, se requiere una base que fije el módulo a una superficie. El peso total del módulo es de unos 200 kg, por lo que la estructura se diseñó en madera. En este sentido, las dimensiones de los soportes angulares para la superficie son de 40 x 40 x 6 mm (Figura 50). Por otro lado, en el proyecto se utilizaron dos tipos de tubos rectangulares; uno es el soporte de 20x40x2 mm para el generador, y el segundo es una base para el motor (Figura 51).



Fig. 49. Base para grupo motor-generator

Fuente: Autor

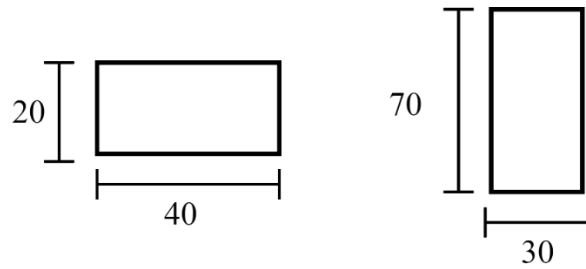


Fig. 50. Soporte para grupo motor-generator

Fuente: Autor

Por otro lado, el segundo tipo de tubo rectangular se utilizó para nivelar el motor principal en relación con el generador; donde sus dimensiones son de 30X70X2mm. Después de ensamblar todos los ángulos y tubos, la longitud total es de 1 metro, 0,6 metros de tubo rectangular de madera y 3 metros de ángulos.

Para conectar los ejes, tanto del generador como del motor principal, se diseñó una mordaza, cuyo material era el hierro (Figura 52). En este sentido, es importante mencionar que las dimensiones consideradas se basan en la medida de los ejes de las maquinas giratorias.

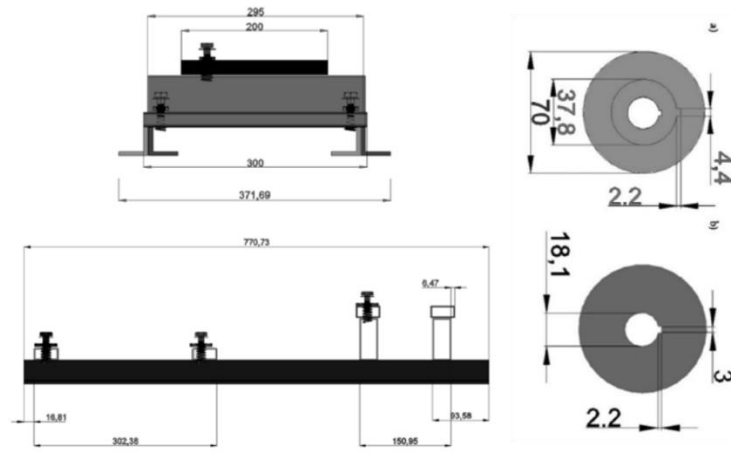
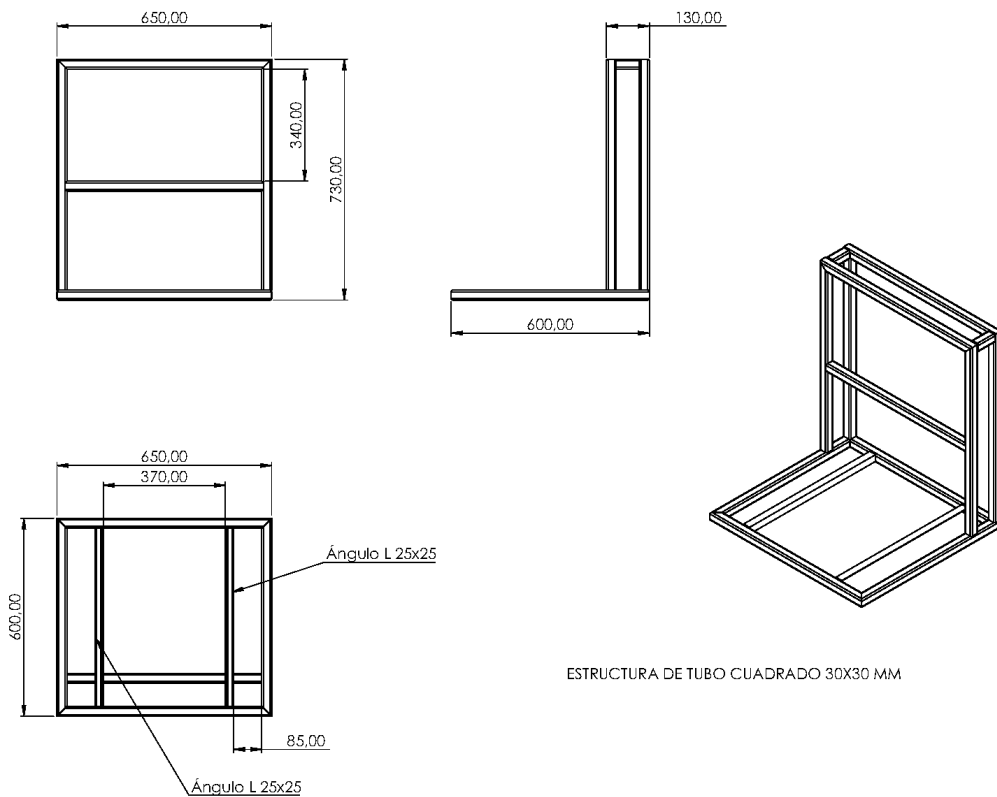


Fig. 51. Estructura base y Acople generador-motor

Fuente: Autor

Por otro lado, la estructura del módulo se la realiza con un tubo cuadrado de 30X30 milímetros. En este sentido, la parte frontal consta de un cuadrado de 600X650 mm con una estructura interna de 600X370 mm.



ESTRUCTURA DE TUBO CUADRADO 30X30 MM

Fig. 52. Estructura de módulo de pruebas

Fuente: Autor

Asimismo, se realiza el diseño de los paneles de la base y la parte vertical, donde el primero posee dimensiones de 650 mm X 600 mm, mientras que el segundo describe medidas de 650 mm X 400 mm. Por último, la disposición tridimensional de los elementos descritos permite tener una perspectiva realista (Figura 55).

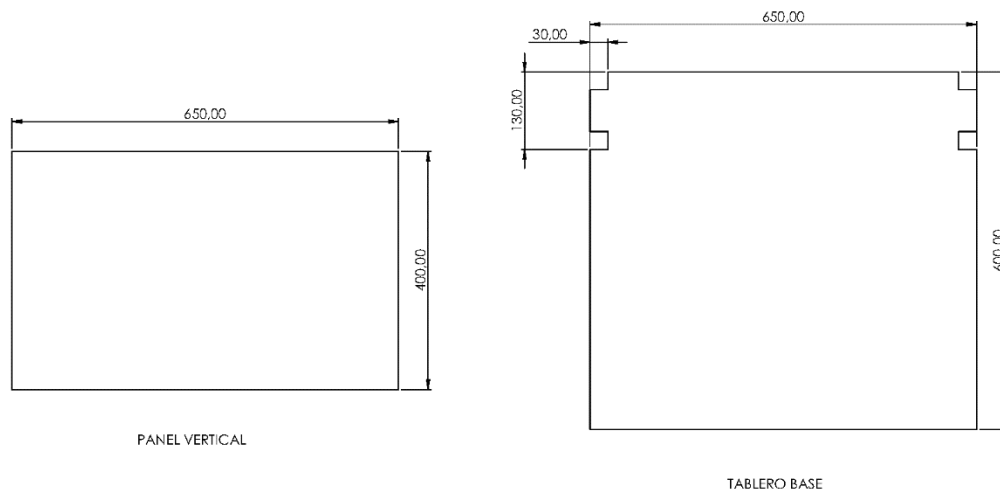


Fig. 53. Diseño de tableros

Fuente: Autor

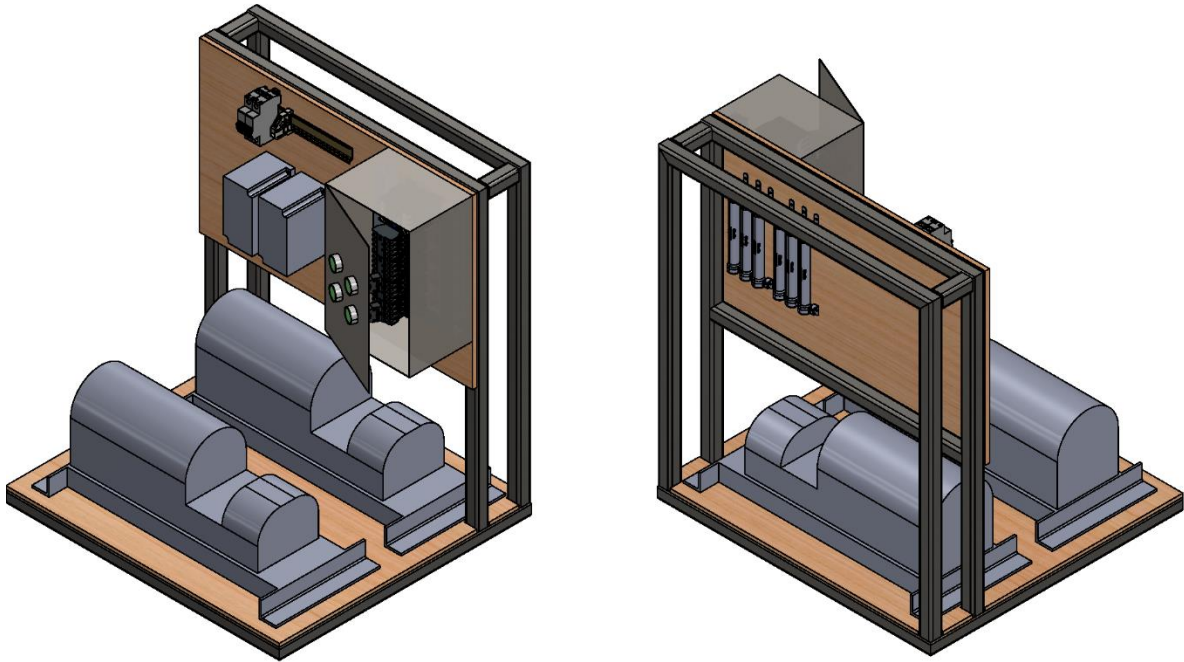


Fig. 54. Vista tridimensional de tablero de pruebas

Fuente: Autor

Una vez concluida la fase del diseño eléctrico, mecánico y determinación de materiales, se procede a la construcción física del módulo de sincronización de generadores síncronos de polos de garras. Para luego realizar las pruebas pertinentes reflejadas en la simulación presentada en esta sección.

Capitulo III




Implementación de módulo de pruebas para sincronización de generadores síncronos de polos de garra






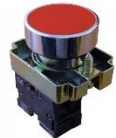


A continuación, se describe el procedimiento llevado a cabo durante la implementación del módulo de sincronización de generadores síncronos de polos de garra. Para lo cual, se expone los materiales y costos asociados, implementación del grupo motor-generador, construcción del circuito de control y del circuito de fuerza. Además, se realiza la comprobación practica del funcionamiento del módulo generador síncrono de polos de garra mediante pruebas en las diferentes etapas de funcionamiento.









3. Materiales y costos asociados




La Tabla 6 expone la cantidad, la descripción, el precio unitario y el precio final de cada uno de los equipos empleados para ensamblar el módulo de pruebas para la sincronización de generadores síncronos de polos de garra.

Tabla 6 Lista de materiales y costos

Cantidad	Descripción	Precio	Imagen
1	Riel din 1 metro	3,2	
1	Gabinete metálico 40X30X15 doble fondo	32,6	
1	Breaker riel 2X20A schneider/Camsco/Ebasee/LS	8	

13	Cable flexible THHN#18 36H	39	
5	Contactores de 18 A marca LS	107,5	
6	Resistencia ADJ PWR RES 10 OHM 100W CHAST MT	159,96	
15	Cable flexible #12	10,05	
5	Pulsadores de marcha NA	15	
5	Pulsador de paro NC	15	
3	Cable concéntrico 3X16	6,21	
5	Prensa estopa	5	

4	Terminales ojo	4	
2	Variadores de frecuencia ZONCN NZ100	640	
3	ABB puente enchufable	12,51	
8	ABB terminal blok entrelec asn	14,28	
9	Contactos auxiliares marca LS	85,5	
27	Borneras	19,98	
3	Capacitores de 2.5 microfaradios	1.35	
3	Boquillas para foco de 24 V	3	

3	Focos de 24V	3	
1	Medidor PZEM004t	40	
4	Borneras de tierra	16	

Fuente: Autor

3.1. Implementación del módulo motor-generator

Una vez realizado el diseño completo del módulo de sincronización de generadores síncronos de polos de garra y definidos los materiales necesarios para su puesta en marcha, se procede a la instalación del módulo que se rigen por los esquemas descritos en la fase de diseño (Figura 56).



Fig. 55. Implementación del grupo motor-generator

Fuente: Autor

3.2. Establecimiento de tablero de control

En esta etapa se interconecta toda la lógica de control que domina los actuadores en cada sección. Para lo cual, todos los elementos necesarios se colocan en una caja metálica aislada, dentro de esta se colocan los contactores y dispositivos de mando sobre un riel din (Figura 57).



Fig. 56. Instauración de tablero de control

Fuente: Autor

3.3. Ensamblaje de circuito de fuerza

El esquema complementario al sistema de control es el circuito de fuerza, mismo que se instala sobre las estructuras diseñadas en secciones anteriores.



Fig. 57. Instauración de circuito de fuerza

Fuente: Autor

3.4. Variador de frecuencia

Llegado a este punto, una vez ensamblado el sistema de control y el circuito de fuerza, se expone la configuración secuencial asociada al variador de frecuencia (Tabla 7). Este dispositivo se emplea para el control de los motores primarios. Además, la configuración se realiza en base a los datos característicos de cada motor.

Tabla 7 Proceso de configuración de variador de frecuencia

Código	Descripción	Opciones	Valor parametrizado
P104	Rotación inversa Selección de prevención	0: rotación inversa no permitida 1: Rotación inversa permitida	0
P105	Frecuencia máxima	Frecuencia mínima de operación 999,9 Hz	60 Hz
P107	Tiempo de aceleración	0-6000,0 seg	10 seg
P108	Desaceleración	0-6000,0 seg	10 seg
P109	Voltaje máximo de V/F	Voltaje intermedio de V/F 500 V	220 V
P209	Tensión nominal del motor	0-500 V	220 V
P210	Relación de velocidad sin corriente de carga	0-999,9 A	3,5 A
P212	Velocidad nominal del motor	0-6000 r/min	3320
P213	Número de polos del motor	0-20	2
P215	Frecuencia nominal del motor	0-400 Hz	60Hz

Fuente: Autor

3.5. Pruebas de funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento se realizan en base al diseño presentado con anterioridad en secciones previas, la misma que describía 4 etapas; funcionamiento de un grupo motor generador y una carga resistiva; adición de una carga resistiva; puesta en paralelo de generadores síncrono de polos de garra y adición de una carga capacitiva. Estos ensayos se realizan para un voltaje de 0.5 pu (6V) y 1 pu (12V).

3.5.1. Ensayo a 6V (0.5 pu)

Los valores de las tablas se obtuvieron mediante el medidor pzem004t, el cual se conectó en la L1 del generador 1, es decir que, solo se está midiendo los valores de una sola línea en las diferentes etapas. Asimismo, los datos de frecuencia fueron cuantificados en los terminales del tablero por medio de un multímetro. Además, para alimentar el campo de los generadores se conectó a una fuente regulable DC con un valor de 6V.

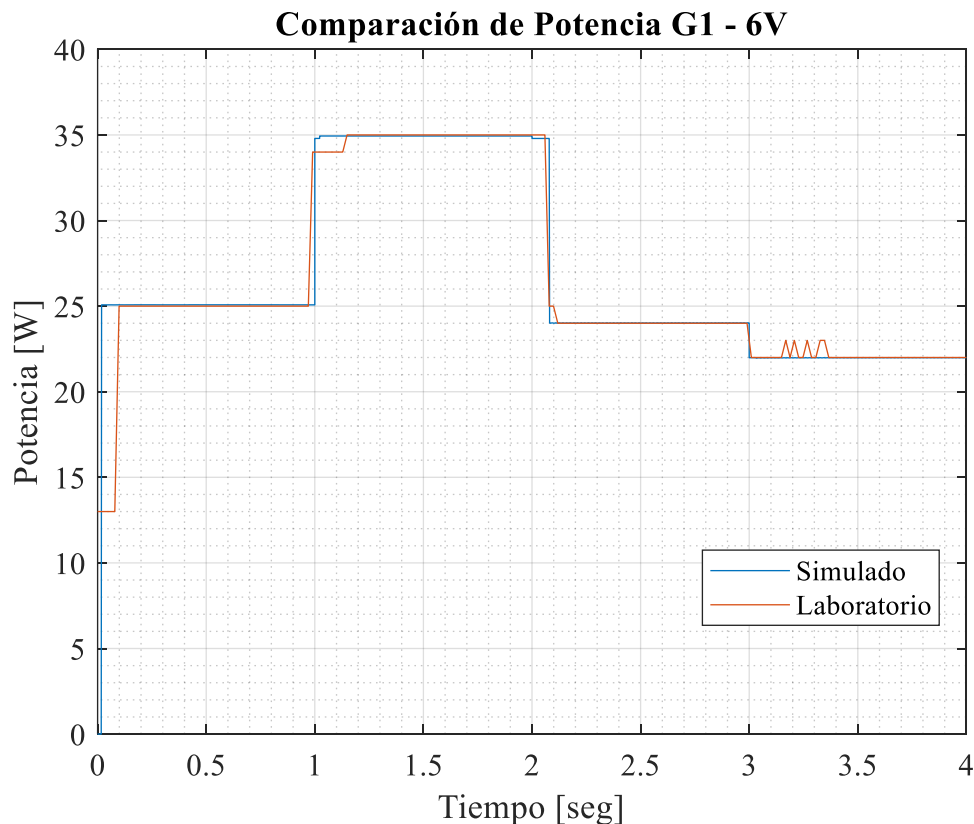


Fig. 58. Comparación de resultados obtenidos generador 1 (0.5 pu)

Fuente: Autor

La figura 59 muestra la potencia activa generada por el generador 1, que inicialmente comienza en 25 W. En el primer segundo, se conecta una carga resistiva adicional, lo que hace que la potencia enviada por el generador 1 aumente a 35 W. Sin embargo, en el segundo, cuando el generador 2 se conecta a la red, se produce un reparto de la carga, con el generador 1 enviando 24 W. Del mismo modo, cuando se conecta una carga capacitiva en el tercer segundo, el generador 1 envía 22 W. Por consiguiente, se puede mencionar que los resultados obtenidos concuerdan con lo que se esperaba según la simulación expuesta con anterioridad en el capítulo 2.

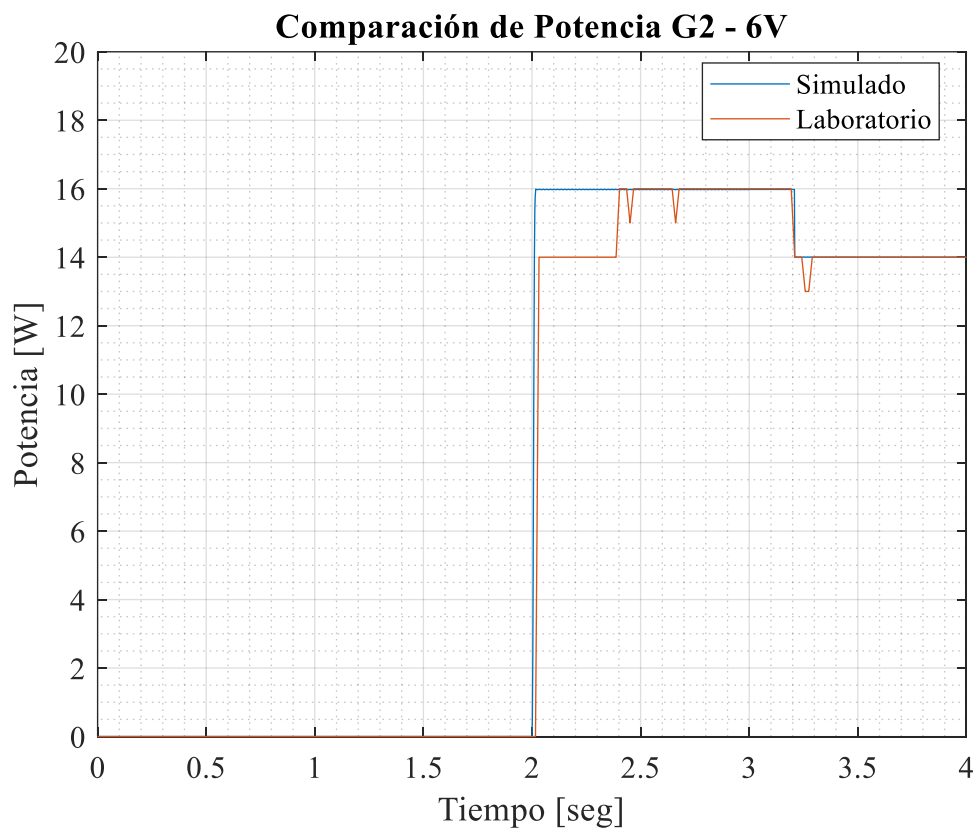


Fig. 59. Comparación de resultados obtenidos generador 2 (0.5 pu)

Fuente: Autor

La figura 60 muestra la potencia activa generada por el generador 2, que inicialmente comienza en 0 W. En el segundo 2, se conecta en paralelo a el generador uno, lo que hace que la potencia enviada por el generador 2 sea de 16 W. Del mismo modo, cuando se conecta una carga capacitiva en el tercer segundo, el generador 2 envía 14 W. Por consiguiente, se puede mencionar que los resultados obtenidos concuerdan con lo que se esperaba según la simulación expuesta con anterioridad en el capítulo 2.

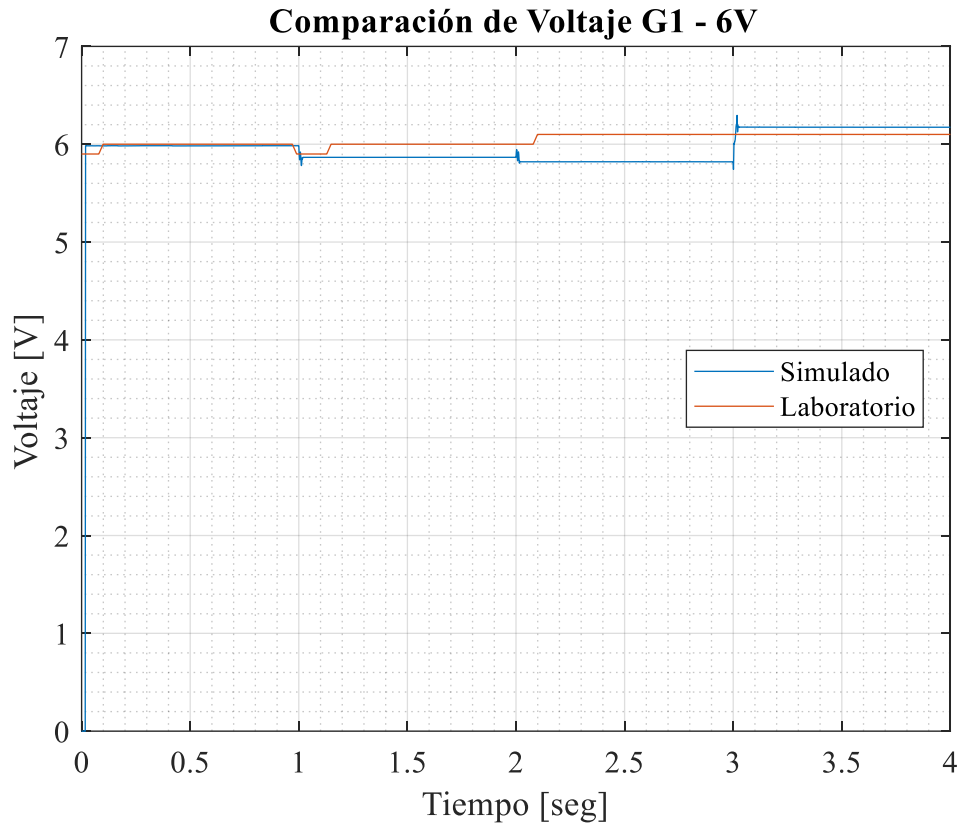


Fig. 60. Comparación de resultados de voltaje obtenidos en el generador 1 (0.5 pu)

Fuente: Autor

La figura 61 muestra el comportamiento del voltaje que describe el generador 1, el cual inicialmente comienza en 6 V. En el primer segundo, se conecta una carga resistiva adicional, lo que hace disminuir ligeramente el voltaje a 5.59 V. Sin embargo, en el segundo, cuando el generador 2 se conecta a la red, se produce un reparto de la carga, con el generador 1 lo que produce una ligera variación de voltaje. Del mismo modo, cuando se conecta una carga capacitiva en el tercer segundo, el generador 1 presenta un aumento de voltaje por encima de los 6 V. Por consiguiente, se puede mencionar que los resultados obtenidos concuerdan con lo que se esperaba según la simulación expuesta con anterioridad en el capítulo 2.

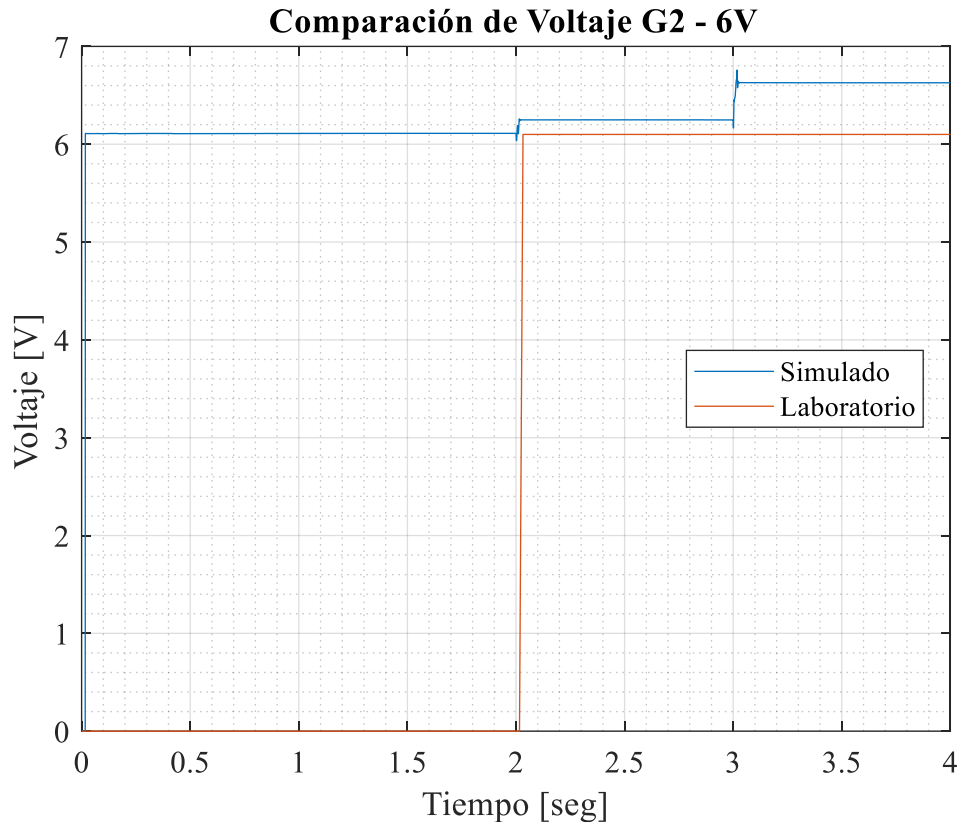


Fig. 61. Comparación de resultados de voltaje obtenidos en el generador 2 (0.5 pu)

Fuente: Autor

La figura 62 muestra el comportamiento del voltaje que describe el generador 2, el cual inicialmente comienza en 6 V para la simulación y en 0 para la experimentación. En el segundo, cuando el generador 2 se conecta a la red, se produce un reparto de la carga, con el generador 1 lo que produce un ligero aumento de voltaje. Del mismo modo, cuando se conecta una carga capacitiva en el tercer segundo, el generador 2 presenta un aumento de voltaje por encima de los 6 V. Por consiguiente, se puede mencionar que los resultados obtenidos concuerdan con lo que se esperaba según la simulación expuesta con anterioridad en el capítulo 2.

3.5.2. Ensayo a 12V (1 pu)

Los valores de las tablas se obtuvieron mediante el medidor pzem004t, el cual se conectó en la L1 del generador 1, es decir que, solo se está midiendo los valores de una sola línea en las diferentes etapas. Asimismo, los datos de frecuencia fueron cuantificados en los terminales del tablero por medio de un multímetro. Además, para alimentar el campo de los generadores se conectó a una fuente regulable DC con un valor de 12V.

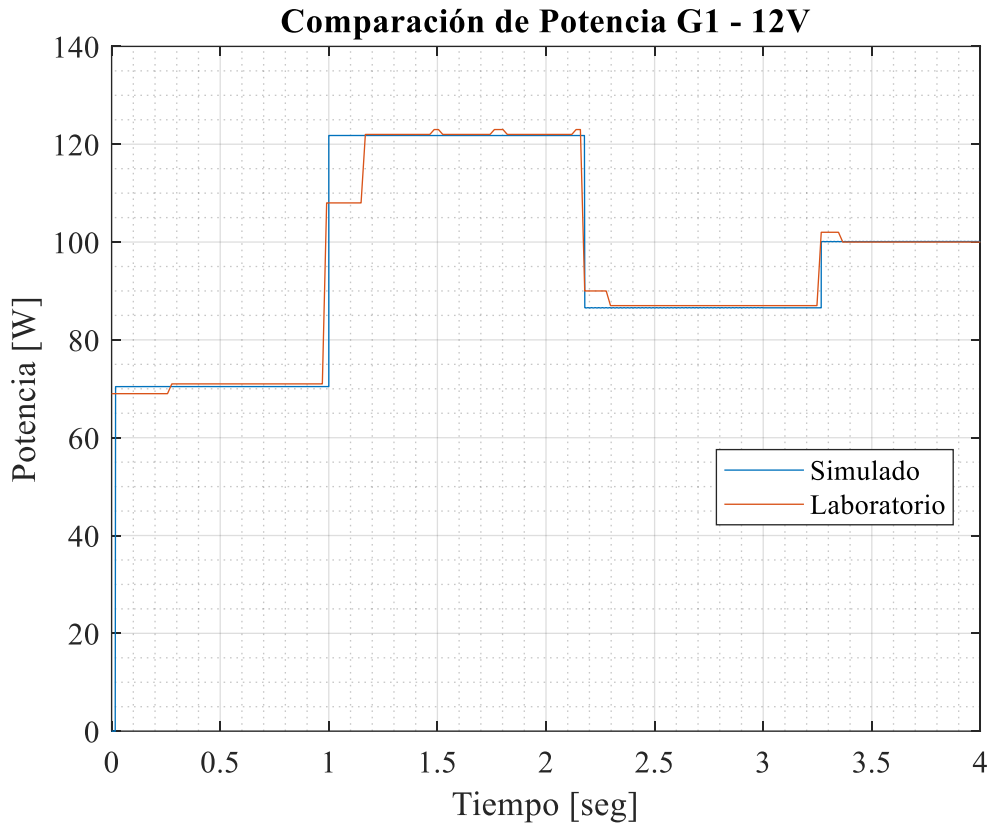


Fig. 62. Comparación de resultados obtenidos generador 1 (1pu)

Fuente: Autor

La figura 63 muestra la potencia activa generada por el generador 1, que inicialmente comienza en 70 W. En el primer segundo, se conecta una carga resistiva adicional, lo que hace que la potencia enviada por el generador 1 aumente a 120 W. Sin embargo, en el segundo, cuando el generador 2 se conecta a la red, se produce un reparto de la carga, con el generador 1 enviando 85 W. Del mismo modo, cuando se conecta una carga capacitiva en el tercer segundo, el generador 1 envía 100 W. Por consiguiente, se puede mencionar que los resultados obtenidos concuerdan con lo que se esperaba según la simulación expuesta con anterioridad en el capítulo 2.

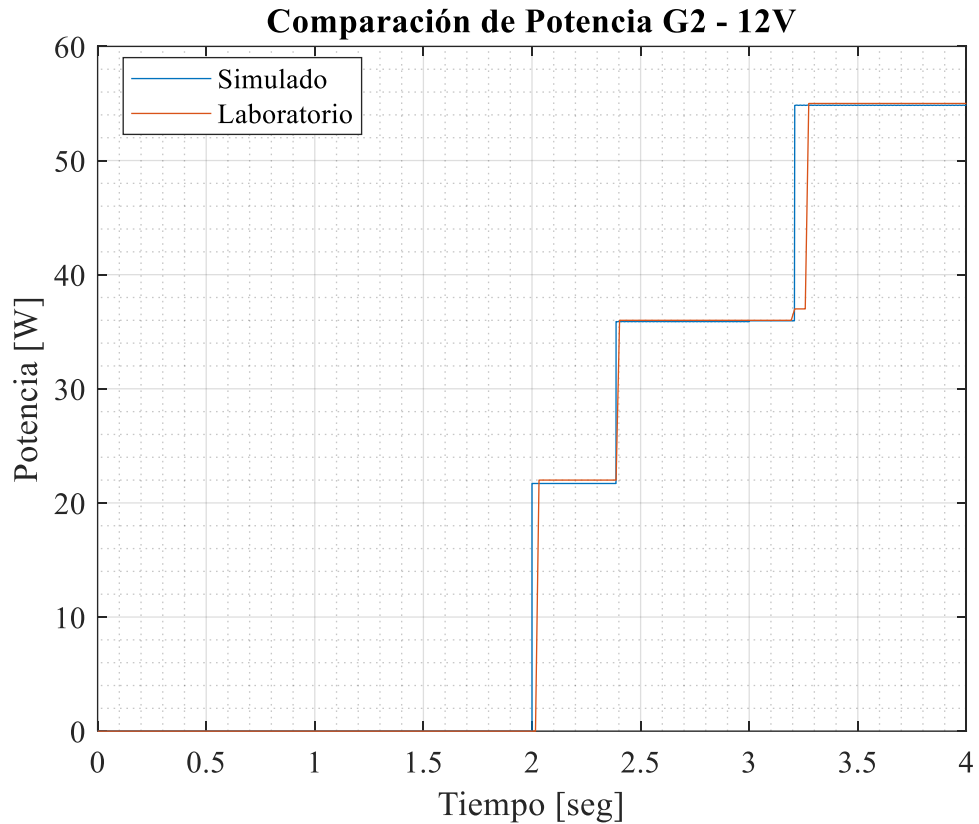


Fig. 63. Comparación de resultados obtenidos generador 2 (1pu)

Fuente: Autor

La figura 64 muestra la potencia activa generada por el generador 2, que inicialmente comienza en 0 W. En el segundo 2, se conecta en paralelo a el generador uno, lo que hace que la potencia enviada por el generador 2 sea de 21 W y luego aumenta a 36 W. Del mismo modo, cuando se conecta una carga capacitiva en el tercer segundo, el generador 2 envía 55 W. Por consiguiente, se puede mencionar que los resultados obtenidos concuerdan con lo que se esperaba según la simulación expuesta con anterioridad en el capítulo 2.

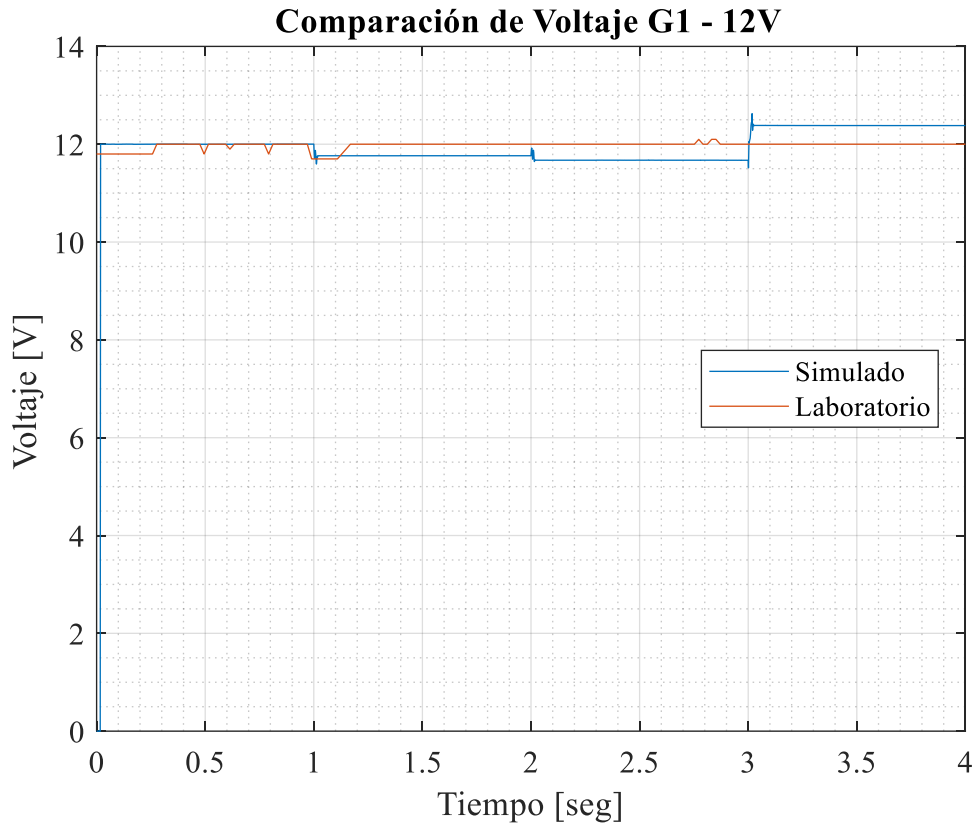


Fig. 64. Comparación de resultados de voltaje obtenidos en el generador 1 (1 pu)

Fuente: Autor

La figura 65 muestra el comportamiento del voltaje que describe el generador 1, el cual inicialmente comienza en 12 V. En el primer segundo, se conecta una carga resistiva adicional, lo que hace disminuir ligeramente el voltaje a 11.90 V. Sin embargo, en el segundo, cuando el generador 2 se conecta a la red, se produce un reparto de la carga, con el generador 1 lo que produce una ligera variación de voltaje. Del mismo modo, cuando se conecta una carga capacitiva en el tercer segundo, el generador 1 presenta un aumento de voltaje por encima de los 12 V. Por consiguiente, se puede mencionar que los resultados obtenidos concuerdan con lo que se esperaba según la simulación expuesta con anterioridad en el capítulo 2.

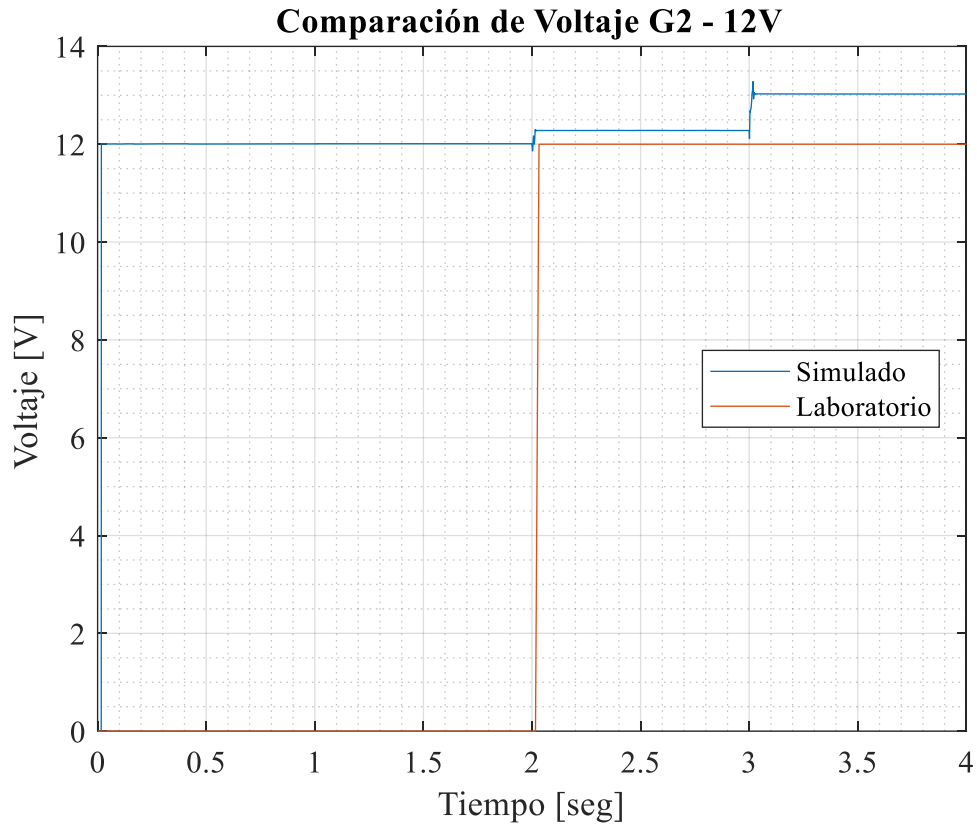


Fig. 65. Comparación de resultados de voltaje obtenidos en el generador 2 (1 pu)

Fuente: Autor

La figura 66 muestra el comportamiento del voltaje que describe el generador 2, el cual inicialmente comienza en 12 V para la simulación y en 0 para la experimentación. En el segundo, cuando el generador 2 se conecta a la red, se produce un reparto de la carga, con el generador 1 lo que produce un ligero aumento de voltaje. Del mismo modo, cuando se conecta una carga capacitiva en el tercer segundo, el generador 2 presenta un aumento de voltaje por encima de los 12 V. Por consiguiente, se puede mencionar que los resultados obtenidos concuerdan con lo que se esperaba según la simulación expuesta con anterioridad en el capítulo 2.

3.6. Conclusiones

- Un generador síncrono es un dispositivo que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Lo hace utilizando un campo magnético giratorio para inducir una tensión alterna en los devanados del estator. El modelo de polo en garra es una representación simplificada de un generador síncrono que resulta útil para comprender sus parámetros de funcionamiento. El modelo de polos en garra consta de un rotor con una serie de polos en forma de garra y un estator con un conjunto de bobinados. Al girar el rotor, los polos en forma de garra inducen un campo magnético en los devanados del estator, lo que genera una salida eléctrica.
- En general, el modelo de polos en garra proporciona un marco útil para comprender los parámetros clave de funcionamiento de un generador síncrono, como la excitación, la carga, la velocidad y el factor de potencia. Comprendiendo estos factores, es posible optimizar el rendimiento de un generador para una aplicación determinada. Para la puesta en marcha de generadores en paralelo se deben cumplir con 4 requisitos. La tensión del generador entrante debe coincidir con la tensión generador en funcionamiento; la frecuencia de todos los generadores debe ser igual; la secuencia de los generadores debe coincidir; los ángulos de fase deben ser iguales.
- Con la implantación del módulo de generadores síncronos de polos de garra se logró realizar las cuatro fases de pruebas establecidas, con la primera fase se pudo generar un voltaje de 7.3V regulando el variador de velocidad a una frecuencia de 15.5Hz conectado a la primera carga resistiva, en la segunda fase se conectó a la segunda carga resistiva logrando obtener diferentes valores de voltaje, corriente y potencia. En la fase tres comprobar los diferentes parámetros que debe tener el segundo generador para conectarlo en paralelo al sistema, generando un voltaje de 7.3v con una frecuencia de 16.3Hz. En este sentido, al conectar el segundo transformador en paralelo existió aumento en la potencia del sistema, lo cual se pudo constatar con el medidor pzem004T y finalmente la conexión de la tercera carga capacitiva. Además, el módulo de generador síncrono de polos de garra tiene la practicidad de que se puede realizar diferentes practicas al modificar la frecuencia mediante el variador de velocidad esto permite generar más voltaje a un límite de 12 que es la capacidad máxima del alternador.

3.7. Recomendaciones

- Con la culminación del módulo de pruebas de un pequeño sistema eléctrico de potencia este está orientado para que futuras generaciones de estudiantes puedan acoplar más mecanismos al sistema, como los que se describen a continuación.

Regulador automático de tensión (AVR): El AVR es un componente crucial que regula la tensión de salida del generador. El regulador debe estar diseñado para funcionar en paralelo y ajustar la tensión del generador a la tensión del sistema.

Controlador de sincronización: El regulador de sincronización debe ser capaz de sincronizar la frecuencia y la fase del generador con la frecuencia y la fase del sistema. Debe poder medir la frecuencia y la fase del sistema y ajustar la frecuencia y la fase del generador en consecuencia.

Relés de protección: Los relés de protección deben ser capaces de detectar cualquier situación anómala, como sobretensión, subtensión, sobrecorriente y averías. Deben estar diseñados para aislar el generador del sistema en caso de anomalías.

Interfaz de comunicación: La interfaz de comunicación debe permitir que el módulo de pruebas en paralelo se comunique con otros generadores del sistema. Debe poder intercambiar información como medidas de tensión, frecuencia y fase con otros generadores para garantizar un funcionamiento sin problemas.

Controlador de reparto de carga: El controlador de reparto de carga debe ser capaz de repartir la carga entre los generadores del sistema. Debe ser capaz de ajustar la salida de cada generador para garantizar que la carga total se distribuye uniformemente entre los generadores.

Panel de control: El panel de control debe proporcionar una interfaz fácil de usar para que el operador controle y supervise el módulo de pruebas en paralelo. Debe mostrar parámetros importantes como la tensión, la frecuencia y la corriente, y proporcionar alarmas y notificaciones en caso de anomalías.

Bibliografía

- Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (2020). .gob.ec. Obtenido de https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/02/18feb20_Proj_-Reg-DO.pdf
- Blogger. (3 de Abril de 2017). Obtenido de <https://generadoresincronos.blogspot.com/2017/04/el-generador-sincrono-o-tambien.html>
- Boldea, I. (2006). VARIABLE SPEED GENERATORS. CRC/Taylor & Francis.
- Boldea, I. (2016). Synchronous Generators. Timisoara: CRC Press.
- Brvo Moya, N. A. (Octubre de 2008). Obtenido de http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2008/bravo_n/sources/bravo_n.pdf
- Chapman, S. (2012). Máquinas Eléctricas 5ta Edición. México: McGRAW-HILL.
- Chapman, S. J. (1987). MÁQUINAS ELÉCTRICAS . Colombia : McGraw-Hill.
- Manuel Alcázar Ortega, C. S. (2019). Generación, transporte y distribución de energía eléctrica. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Martínez García, F., & Navarro Gomez, S. (s.f.). Obtenido de <https://www.aedie.org/webrevista/articulos/num1/192-Martinez.pdf>
- Rodríguez Pozueta, M. A. (2015). Obtenido de <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Maquina%20sincrona%20aislada.pdf>
- Valenzuela Santillán, A. D. (2013). Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7078/1/CD-5255.pdf>
- Guler, N., & Irmak, E. (2017). Design, implementation, and verification of computer interactive parallel connection system with load-sharing control for synchronous generators. *Electrical Engineering*, 99(1), 241–263. <https://doi.org/10.1007/s00202-016-0413-2>
- Illesca, E. (2019). Diseño de un Sistema de Sincronismo Automático para una Central Térmica de 4 . 5MW con 3 Grupos Electrógenos en un Proyecto Minero del Sur del Perú. Universidad Tecnológica del Perú.
- Sajadi, A., Kenyon, R. W., & Hodge, B. M. (2022). Synchronization in electric power networks with inherent heterogeneity up to 100% inverter-based renewable generation. *Nature Communications*, 13(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30164-3>
- Schaefer, R. C. (2016). The art of generator synchronizing. 2016 IEEE Pulp, Paper & Forest

Industries Conference (PPFIC), 88–95. <https://doi.org/10.1109/PPIC.2016.7523471>

Anexo Registro gráfico de construcción de módulo

