

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



**REDISEÑO DE DEVANADO DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES
BIFÁSICO PARA FUNCIONAMIENTO COMO GENERADOR TRIFÁSICO**

Trabajo de Grado presentado ante la Ilustre Universidad Técnica del Norte previo a la
obtención del título de Ingeniero Eléctrico.

AUTOR:

César Jesús Yánez Angulo

DIRECTOR(A):

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

Ibarra, 2024



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:	1751138841		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Yánez Angulo César Jesús		
DIRECCIÓN:	Ibarra/Imbabura		
EMAIL:	cjaneza@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	02 2020857	TELÉFONO MÓVIL:	0998614162

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	REDISEÑO DE DEVANADO DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES BIFÁSICO PARA FUNCIONAMIENTO COMO GENERADOR TRIFÁSICO.
AUTOR:	Yánez Angulo César Jesús
FECHA: DD/MM/AAAA	01/08/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> GRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Electricidad
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc

2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 07 días del mes de febrero de 2024

EL AUTOR:



Yáñez Angulo César Jesús
C.I: 1751138841



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS APLICADAS**

CERTIFICACIÓN DE DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Yo, Jhonny Javier Barzola Iza en calidad de tutor del señor estudiante Yánez Angulo César Jesús, certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado **“REDISEÑO DE DEVANADO DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES BIFÁSICO PARA FUNCIONAMIENTO COMO GENERADOR TRIFÁSICO.”**.

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.
DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Dedicatoria

A mis amados padres, Alcides y Sandra, cuyo constante amor, sabiduría y ejemplo de perseverancia han sido mi mayor inspiración en este viaje académico, además de su incansable apoyo económico y emocional, que ha sido el sostén fundamental que me ha permitido alcanzar este logro.

A mis hermanos, cuyo aliento y motivación han sido un impulso invaluable en los momentos más desafiantes de este camino hacia la culminación de mi tesis.

A Angeles, por creer en mí incondicionalmente, por ser mi roca en los momentos de duda y por celebrar cada uno de mis éxitos como si fueran propios. Tu amor y apoyo han sido mi mayor fortaleza.

Y a Jhonny Barzola, mi tutor de tesis, por su dedicación, orientación y apoyo tanto académico como emocional a lo largo de este proceso. Su guía ha sido fundamental en el desarrollo de este trabajo.

A todos ustedes, les dedico este trabajo con profundo agradecimiento y amor.

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte por brindarme la oportunidad de cursar mis estudios superiores y por proporcionarme un ambiente propicio para el aprendizaje y el crecimiento personal y profesional.

Agradezco de manera especial a todos mis profesores a lo largo de mi carrera académica. Su dedicación, experiencia y enseñanzas han sido fundamentales en mi formación como profesional. Gracias por transmitirme no solo conocimientos, sino también valores como la honestidad y el respeto, que considero pilares indispensables en mi desarrollo tanto académico como humano.

Su apoyo y guía han sido invaluable en la realización de este trabajo de grado, y estoy profundamente agradecido por todo lo que han hecho por mí.

A la Universidad Técnica del Norte y a mis estimados profesores, les dedico este logro como un testimonio de mi profundo agradecimiento y reconocimiento hacia su labor y contribución en mi formación académica y profesional.

Tabla de contenido

Resumen	XI
Abstract	XII
Introducción	XIII
Problema	XV
Formulación del problema	XV
Objetivos.....	XVI
Objetivo General	XVI
Objetivos Específicos	XVI
Justificación.....	XVI
Alcance	XVII
<i>CAPÍTULO 1.....</i>	<i>1</i>
1.1 Principios básicos de funcionamiento.....	1
1.1.1 Teorema de Ferraris	1
1.1.2 Campo magnético giratorio	2
1.2 Generador eléctrico.....	4
1.2.1 Generador eléctrico asíncrono.....	5
1.2.2 Generador eléctrico síncrono	5
1.2.3 Partes fundamentales de un generador síncrono	7
1.2.4 Estator	7
1.2.5 Rotor	9
1.2.6 Sistema de enfriamiento.....	9
1.2.7 Regulador de tensión (AVR).....	10
1.2.8 Regulador de velocidad (RAS).....	11
1.2.9 Excitatriz	11
1.3 Tipos de diseño de un generador síncrono	12
1.4 Generador síncrono con polos salientes en el estator	12
1.5 Generador síncrono con polos salientes en el rotor	13
1.6 Generador síncrono sin escobillas	13
1.7 Circuito Equivalente y diagramas	14
4.1 Circuito equivalente generador síncrono	14
4.2 Diagrama de potencia de un generador síncrono	15
4.3 Operación de generadores en paralelo con sistemas de potencia	16
4.4 Operación con grandes sistemas de potencia	16
4.5 Operación con otros sistemas del mismo tamaño	17
4.6 Curva de capacidad.....	18
4.7 Aplicaciones del generador síncrono.....	19
1.8 Otros componentes necesarios	20
1.8.1 Transformador	20
1.8.2 Rectificador AC/DC	21

CAPÍTULO 2.....	23
2.1. Diseño del nuevo devanado trifásico	23
1.1 Diagrama de flujo del trabajo de grado	23
2.2. Descripción de metodología	23
2.2.1 Materiales para el Nuevo Devanado:.....	24
2.2.2 Herramientas de Construcción:	25
2.2.3 Materiales para Pruebas Experimentales:	25
2.2.4 Materiales de Documentación:	26
2.2.5 Materiales de Seguridad:.....	26
2.2.6 Materiales para Construcción de Prototipo:.....	26
2.3. Datos iniciales del G.S bifásico.....	27
2.4. Diseño del nuevo devanado.....	29
2.4.1 Datos del GS bifásico	30
2.4.2 Diseño del nuevo devanado	30
2.5. Transformador reductor	32
2.6. Rectificador AC/DC.....	33
Capítulo 3	34
3.1 Diseño detallado del nuevo devanado	34
3.1.1 Selección de materiales y componentes.....	34
3.2 Proceso de construcción del prototipo	35
3.2.1 Consideraciones de seguridad	45
3.2.2 Pruebas preliminares del prototipo	45
3.2.3 Evaluación del rendimiento del prototipo	46
3.3 Conclusiones	47
3.4 Recomendaciones	47
Referencias	48
Anexos	52

Índice de Figuras

Figura 1, Campo magnético giratorio en el estator en movimiento.....	3
Figura 2, Polos magnéticos del estator cuyo movimiento alterna su polaridad cada 90 grados.....	3
Figura 3, Fuerza electromotriz (fem) en una espira.....	4
Figura 4, Partes de un generador síncrono.....	7
Figura 5, Conexión de un generador conectado en estrella.....	8
Figura 6, Conexión de un generador conectado en delta.....	9
Figura 8, Generador síncrono con polos salientes en el estator.....	13
Figura 9, Generador síncrono con polos salientes en el rotor.....	13
Figura 10, Generador síncrono sin escobillas.....	14
Figura 11, Circuito equivalente por fase completo.....	15
Figura 12, Diagrama par/potencia del generador síncrono.....	16
Figura 13, Efecto del incremento en la corriente de campo del mecanismo regulador en el diagrama fasorial de la máquina.....	17
Figura 14, Diagrama de carga en paralelo con un sistema del mismo tamaño.....	18
Figura 15, Diagrama fasorial del generador síncrono.....	19
Figura 16, Rollos de alambre de cobre para rebobinar.....	24
Figura 17, Barniz aislante.....	25
Figura 18, Bobinadora manual.....	25
Figura 19, Placa de datos del motor impulsador.....	26
Figura 20, Condición inicial del rotor del G.S bifásico.....	27
Figura 21, Condición inicial del estator del G.S bifásico.....	28
Figura 22, Tablero de conexiones y autoexcitación del G.S bifásico.....	28
Figura 24, Bobinados de generador trifásico.....	29
Figura 25, Diagrama de devanados.....	31
Figura 26, Ubicación física de los devanados en el estator.....	32
Figura 27, Transformador reductor.....	32
Figura 28, Rectificador AC/DC.....	33
Figura 29, Estado inicial del estator con su aislamiento.....	35
Figura 30, Conductores de los devanados al descubierto sin aislante.....	35

Figura 31, Núcleo limpio sin devanados.....	36
Figura 33, Ranuras del núcleo aisladas con papel aislante.	36
Figura 34, Bobinadora manual con el nuevo devanado.	37
Figura 36, Devanados colocados y sellados con tapas de plástico en cada ranura.	37
Figura 39, Devanados amarrados al núcleo del generador.	38
Figura 40, Colocando barniza en los devanados.....	38
Figura 42, Excitatriz sin una bobina.	39
Figura 44, Excitatriz barnizada y amarrado.	40
Figura 45, Preparando excitatriz antes de armar el GS trifásico.....	40
Figura 47, GS trifásico armado completamente.	41
Figura 49, Estructura soldada con ruedas de 360 grados.	42
Figura 51, GS trifásico y motor impulsor con sus respectivos acoples.	42
Figura 52, Bandas de goma colocadas en los acoples.	43
Figura 53, Armando tablero de control.....	44
Figura 46, Módulo de pruebas listo.	45

Resumen

La sobre explotación de recursos no renovables causa un impacto negativo en nuestro planeta, algunas de las consecuencias son el cambio climático, efecto invernadero, destrucción de ecosistemas, entre otras. Para evitar esta sobre explotación, lo mejor es reutilizar los materiales, equipos y máquinas de las que ya disponemos para optimizar recursos. Para reutilizar estos recursos se rediseño y reconstruyó los devanados de un generador síncrono bifásico para que funcione como un generador trifásico para montar un módulo experimental de pruebas. Para realizar este trabajo se realizó una investigación bibliográfica sobre generadores síncronos y posterior a la investigación se levantaron todos los datos posibles del generador en sus condiciones iniciales para diseñar los nuevos devanados tomando como base los datos previos. El siguiente paso fue la implementación del diseño para reconstruir el generador con el fin de que trabaje como un generador síncrono trifásico. Una vez reconstruido se realizaron pruebas para verificar el funcionamiento de cada una de las partes y después se montó el módulo de pruebas con un motor asíncrono impulsor y un tablero de conexiones para realizar pruebas experimentales. El rediseño y reconstrucción del generador tuvo éxito en base a las pruebas realizadas, aun teniendo en cuenta las limitaciones físicas del generador como el espacio en el núcleo y el número de ranuras. Lo que demuestra que se pueden reutilizar materiales y máquinas para otras aplicaciones.

Palabras clave: Devanado, síncrono, asíncrono, bifásico, trifásico, ranuras, núcleo.

Abstract

The overexploitation of non-renewable resources causes a negative impact on our planet, some of the consequences are climate change, greenhouse effect, destruction of ecosystems, among others. To avoid this overexploitation, it is best to reuse the materials, equipment and machines we already have to optimize resources. To reuse these resources, the windings of a two-phase synchronous generator were redesigned and rebuilt to function as a three-phase generator to assemble an experimental test module. To carry out this work, a bibliographic investigation was carried out on synchronous generators and after the investigation, all the possible data of the generator in its initial conditions were collected to design the new windings based on the previous data. The next step was the implementation of the design to rebuild the generator to work as a three-phase synchronous generator. Una vez reconstruido se realizaron pruebas para verificar el funcionamiento de cada una de las partes y después se montó el módulo de pruebas con un motor asíncrono impulsor y un tablero de conexiones para realizar pruebas experimentales. El rediseño y reconstrucción del generador tuvo éxito en base a las pruebas realizadas, aun teniendo en cuenta las limitaciones físicas del generador como el espacio en el núcleo y el número de ranuras. Lo que demuestra que se pueden reutilizar materiales y máquinas para otras aplicaciones.

Keywords: Winding, synchronous, asynchronous, biphasic, three phase, grooves, core.

Introducción

Las máquinas eléctricas de corriente alterna fueron una revolución desde su creación cambiando el mundo y todavía se sigue utilizando hoy en día, aunque han existido muchas mejoras el principio de funcionamiento es el mismo por lo que estas máquinas siguen siendo el pilar de la electricidad como se conoce hoy (Endesa, 2019).

En el pasado (época preindustrial e industrial) la mayoría de las fuentes de energía eran no renovables y altamente contaminantes, debido a la falta de recursos tecnológicos y la facilidad de extracción de estos, y los generadores eléctricos jugaban un papel fundamental en la conversión de energía mecánica a eléctrica, aunque la fuente de la energía mecánica fuera de orígenes contaminantes. Todo este proceso generó un gran avance científico, pero también consecuencias negativas sobre el medio ambiente (Global Carbón Atlas, 2013).

Hoy en día, gracias a los grandes avances tecnológicos existen diversas formas de generación de energía limpia y autosustentable pero, la mayoría se basa en la conversión de energía mecánica en energía eléctrica gracias a generadores eléctricos, y en países de primer mundo la generación de energía mecánica viene de fuentes renovables como la energía eólica y nuclear (Canseco, 2019), por el contrario, en países de Latinoamérica su matriz energética está compuesta principalmente de hidrocarburos como gas natural y petróleo, que si bien cumplen su función de generar energía mecánica también son muy contaminantes pero son tan utilizados ya que alimentan importantes sectores productivos como la industria y el transporte (Hernández, 2020). Específicamente en Ecuador, la fuente de energía predominante es la hidroeléctrica con un 57.97% de la potencia de generación eléctrica del país, otras de las principales fuentes son MCI, turbo gas, y centrales térmicas con 24,65%, 12.42% y 9.21%, finalmente fuentes renovables como la solar, eólica y biomasa solo ocupan un 0.14%, 0.31% y 1.74% respectivamente de la energía total producida (Solar, 2018). Poniendo de lado la energía solar, todas las demás utilizan generadores eléctricos que se mueven gracias a la energía mecánica que es producida por diversos medios, algunos más contaminantes que otros, pero en general los generadores eléctricos son indispensables en la generación de electricidad del país.

Aunque es indispensable aumentar el porcentaje de fuentes renovables a gran escala en el país también es importante reducir el uso de recursos no renovables (petróleo, gas natural,

minería, entre otros) y empezar a buscar alternativas que reduzcan la explotación de estos recursos, principalmente en sectores productivos como el transporte y la industria ya que en los mismos es donde más hidrocarburos se consume actualmente (Hernández, 2020). En Latinoamérica el interés y las inversiones en energías renovables y reutilización o reciclaje de máquinas son muy inferiores a las de otros países de primer mundo (KPMG, 2016).

Las máquinas eléctricas como motores y generadores son fundamentales en comercios e industrias, algunas de las aplicaciones es ventiladores, bombas, generadores de emergencia, entre otros. Los componentes de una máquina eléctrica están formados de materiales como: cobre, aluminio, y acero, lo que facilita el reciclaje o reacondicionamiento de las partes de una máquina eléctrica (Alberich, 2018).

Una de las maneras para reutilizar los componentes de una máquina eléctrica es el rebobinado de los diferentes devanados ya sea para mantener o cambiar las características de dicha máquina, el motivo para realizar este proceso puede ser por el deterioro de estos o para readecuar la máquina eléctrica para que se ajuste a nuevas necesidades (Ematec, 2022).

Problema

La sobreexplotación de los recursos naturales en las últimas décadas, principalmente los recursos no renovables, ha tenido un impacto negativo en el planeta dando como resultado el cambio climático, el efecto invernadero, destrucción de ecosistemas, entre otras consecuencias. Actualmente cualquier máquina necesita un mantenimiento, ya sea preventivo o correctivo y las máquinas eléctricas no son una excepción y este mantenimiento es importante para su correcto funcionamiento y alargar la vida útil de la misma. Una de las causas de la sobreexplotación de recursos es el desecho de equipos funcionales que ya no se adaptan a las necesidades del modernas o desecho de máquinas en mal estado que aún tienen componentes funcionales que se podrían aprovechar ya sea en un entorno industrial, comercial o residencial. El rápido avance de nuevas tecnologías permite desarrollar mejores equipos, sin embargo, esto produce el desecho de “equipos obsoletos” para adquirir nuevas maquinarias que se ajusten a las necesidades del momento que en poco tiempo volverán a ser consideradas obsoletas. Actualmente muchos lugares como centros comerciales, hospitales, industrias, entre otros utilizan generadores eléctricos de emergencia, que fueron dimensionados para alimentar una carga determinada, pero, con el pasar del tiempo esta carga aumenta y se deben cambiar también los generadores, y en ocasiones cambiar de uno monofásico o bifásico a trifásico para satisfacer las necesidades del lugar.

Formulación del problema

¿Cómo reacondicionar un generador síncrono bifásico para que funcione como un generador síncrono trifásico manteniendo características funcionales iniciales?

Objetivos

Objetivo General

Rediseñar un generador síncrono bifásico de polos salientes mediante el reacondicionamiento de su devanado para aplicarlo como generador trifásico.

Objetivos Específicos

- Describir las características de diseño y funcionamiento de generadores síncronos de polos salientes de baja potencia mediante una investigación bibliográfica.
- Realizar el diseño del generador síncrono trifásico tomando como base el generador síncrono bifásico para su reacondicionamiento.
- Implementar un devanado estatórico trifásico para montarlo en un módulo de pruebas.

Justificación

El desarrollo de este trabajo de grado busca diseñar un generador bifásico síncrono para convertirlo en un generador trifásico síncrono y posteriormente implementarlo en un módulo de pruebas para los estudiantes de la carrera de electricidad de la Universidad Técnica del Norte. La finalidad del reacondicionamiento del generador es demostrar que se le puede dar un nuevo uso a un generador reacondicionándolo para que pueda satisfacer nuevas necesidades y que el mismo es funcional para cualquier otro uso en otros entornos, como el industrial y comercial y de esta manera probar que no es necesario desechar este tipo de equipos para cambiarlos por nuevos, sino que es posible readecuarlos para que puedan seguir utilizándolos y que con un mantenimiento correcto se pueda alargar la vida útil de los equipos y así poder aprovechar de una mejor manera los recursos disponibles y se pueda disminuir el impacto ambiental de la sobreexplotación de los mismos.

Alcance

El trabajo de titulación tiene como objeto reacondicionar un generador bifásico síncrono y convertirlo en un generador trifásico síncrono y su posterior implementación en un módulo para pruebas. Para realizar el diseño de este proyecto se realizará una investigación sobre maquinas eléctricas, específicamente el tema de generadores síncronos y distribución de devanados, analizando sus partes y funcionamiento con el fin de desarrollar el diseño de un devanado trifásico y alternativas que logren un buen rendimiento para reacondicionar el generador síncrono bifásico y convertirlo en un generador síncrono trifásico manteniendo características del generador inicial como el voltaje de 120 voltios por fase y la potencia de 6.5 hp de funcionamiento. Posterior al diseño se reconstruirá el generador y se lo implementará en un módulo, el mismo que contará con un motor externo impulsador conectado a la red que estará acoplado mecánicamente al generador reacondicionado para realizar pruebas de funcionamiento en el mismo. Para el acople del motor con el generador se utilizará un variador de frecuencia en el motor impulsador para el arranque del generador. El módulo contará con sus respectivas protecciones, pulsadores de accionamiento y señales visuales (luminarias piloto) para observar el funcionamiento del generador. Al finalizar la implementación del módulo de pruebas se creará un manual de funcionamiento con las pruebas realizadas para los usuarios de este.

CAPÍTULO 1

Una máquina eléctrica es un dispositivo que tiene la capacidad de convertir la energía mecánica o fuerza electromotriz en electricidad y viceversa, por otra parte, también existen máquinas eléctricas capaces de transformar la energía eléctrica para hacer más fácil su transporte y su posterior utilización. Se puede clasificar las máquinas eléctricas en tres grandes grupos: los generadores, los motores y los transformadores (Prodel, 2022).

1. Principios básicos de funcionamiento

1.1.1 Teorema de Ferraris

El teorema de Ferraris expresa que para un conjunto o grupo de devanados separadas de forma equidistante y por las que circulan corrientes senoidales que están desfasadas en el tiempo. Esto genera un campo magnético con forma senoidal que se mueve en el espacio con una frecuencia determinada (Rodríguez, 2018). Este teorema se puede generalizar a un devanado polifásico de cualquier número de fases m : Cuando un devanado polifásico, formado por m fases idénticas, tales que entre dos fases consecutivas hay una separación en el espacio de $2\pi/m$ radianes eléctricos, es alimentado por un sistema polifásico equilibrado de m corrientes, desfasadas en el tiempo $2\pi/m$ radianes, se genera en el entrehierro una f.m.m (fuerza magnetomotriz) que gira a velocidad constante y cuyo valor máximo es $m/2$ veces el valor máximo en el espacio y en el tiempo (F_m) de la f.m.m (fuerza magnetomotriz) generada por una sola fase actuando aisladamente (Rodríguez, 2018).

Este teorema se puede aplicar a cualquier tipo de devanado polifásico equilibrado; es decir, a cualquier devanado equilibrado donde el número de fases m no sea igual a la unidad. En el caso de devanado bifásico ($m = 2$) se tienen dos fases que están desfasadas en el espacio 90° ($\pi/2$ radianes) eléctricos y que se alimentan con corrientes desfasadas 90° en el tiempo (Rodríguez, 2018).

La velocidad con la que la fuerza electromotriz genera un giro, la misma que es creado a partir del Teorema de Ferraris es conocida velocidad de sincronismo. En función de las unidades que se utilices para medir esta velocidad, se obtiene lo siguiente:

- Velocidad de sincronismo medida en revoluciones por minuto (RPM):

$$n_1 = \frac{60 f}{p}$$

- Velocidad de sincronismo medido en radianes eléctricos por segundo (rad elec/s):

$$\omega_1 = 2\pi f$$

En las expresiones anteriores p es el número de pares de polos del devanado y f es la frecuencia de las corrientes.

El Teorema de Ferraris es la piedra angular para comprender el funcionamiento de las máquinas eléctricas de corriente alterna con más de una fase en sus devanados. Este teorema indica que mediante un devanado polifásico -que puede estar situado en el estator y, consecuentemente, estar inmóvil- se puede crear un campo magnético móvil en el entrehierro similar al que generaría un imán permanente que girara a la velocidad de sincronismo (Rodríguez, 2018).

1.1.2 Campo magnético giratorio

La máquina eléctrica de corriente alterna más sencilla es aquella que produce un voltaje de corriente alterna senoidal en una espira de alambre por donde también pasa un campo magnético uniforme. Este caso no se puede extrapolar a las máquinas de corriente alterna de la vida real ya que el flujo en las máquinas de corriente alterna en la vida real no es constante en dos aspectos: ni en magnitud ni en dirección. Sin embargo, los factores que controlan el voltaje y el par en la espira son los mismos que los factores que controlan el voltaje y el par en las máquinas de corriente alterna reales (Chapman, 2015).

Si existen 2 campos magnéticos presentes en una máquina eléctrica, se creará un par que siempre tenderá a alinear los 2 campos magnéticos. Si un campo magnético es producido por el estator de una máquina eléctrica de corriente alterna y el otro lo produce el rotor de la misma máquina, entonces se inducirá un par en el rotor que generará un movimiento giratorio que buscará constantemente alinearse con el campo magnético del estator (Chapman, 2015).

El campo magnético que se genera en el estator se puede ser representado con un polo norte (salida del flujo magnético) y un polo sur (entrada del flujo magnético). Estos 2 polos magnéticos completan un ciclo o una rotación mecánica alrededor de la superficie del estator por cada ciclo eléctrico de la corriente que es aplicada para generar el campo magnético. Por este motivo, la velocidad mecánica de giro del campo magnético en revoluciones por segundo (RPS) es igual a la frecuencia eléctrica en Hz.

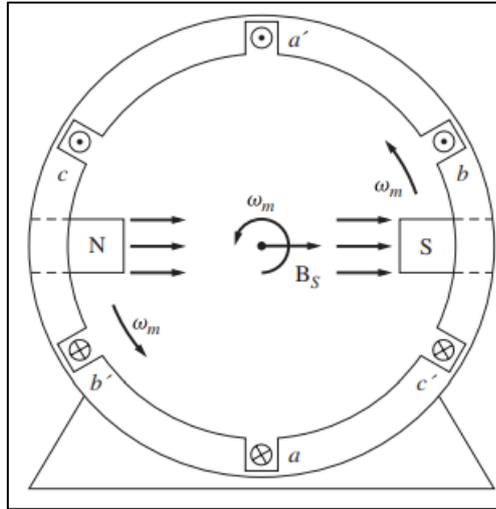


Figura 1, Campo magnético giratorio en el estator en movimiento.

$$f_e = f_m$$

$$\omega_e = \omega_m$$

En el caso de esta figura f_m y ω_m representan a la velocidad mecánica en revoluciones por segundo (RPS) y radianes por segundo, mientras que f_e y ω_e representan a la velocidad eléctrica en Hz y radianes por segundo. El orden de las bobinas del estator con 2 polos, si se repite la secuencia da lo siguiente: a-c'-b-a '-c-b'-a-c'-b-a'-c-b'.

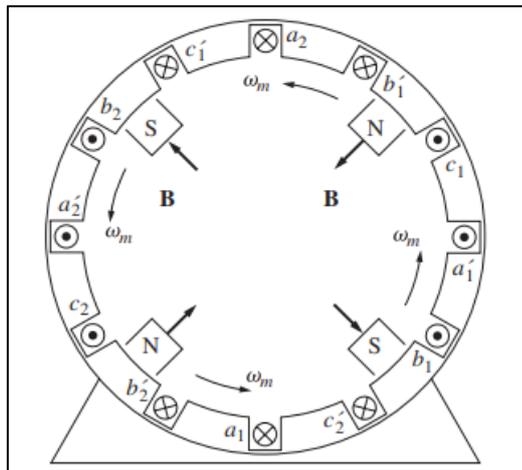


Figura 2, Polos magnéticos del estator cuyo movimiento alterna su polaridad cada 90 grados.

1.2 Generador eléctrico

Un generador eléctrico es un dispositivo que convierte energía mecánica, es decir el movimiento o fuerza electromotriz en energía eléctrica. Para lo cual debe mantener una diferencia de potencial entre dos puntos denominados polos. Por la ley de Faraday, al hacer girar una espira dentro de un campo magnético, se produce una variación del flujo de dicho campo a través de la espira y por tanto se genera una corriente eléctrica (Teresa & Serrano, 2018).

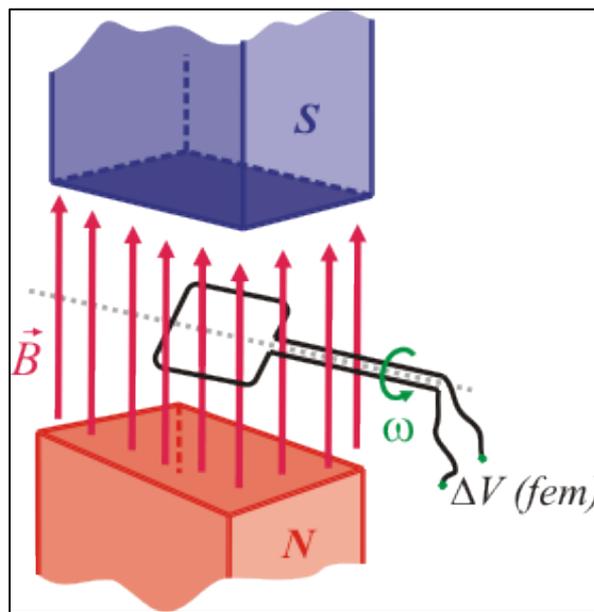


Figura 3. Fuerza electromotriz (fem) en una espira.

En la figura anterior, la espira rectangular gira dentro de un campo magnético, por lo que el flujo del campo a través de ella varía con el pasar del tiempo lo que genera una corriente que circula por la espira, por lo que entre los bornes (representados de color verde) se crea una diferencia de potencial entre 2 puntos ΔV (fuerza electromotriz inducida) (Teresa & Serrano, 2018).

En las centrales de generación de energía eléctrica (nucleares, térmicas, hidráulicas, entre otras) la energía mecánica que el generador transforma en energía eléctrica proviene del movimiento de una turbina, accionada dependiendo del tipo de central por vapor de agua, aire o agua (Teresa & Serrano, 2018).

Un generador está formado de dos partes fundamentales, el estator (parte fija) y el rotor (parte móvil). El estator, que es la parte estática del generador y el que actúa como

inducido, mientras que el rotor, que es la parte móvil conectada al eje de la turbina y es el que actúa como inductor (Teresa & Serrano, 2018).

El rotor puede estar constituido por un imán permanente o más frecuentemente, por un electroimán. Un electroimán es un dispositivo formado por una bobina enrollada en torno a un material ferromagnético por la que se hace circular una corriente, que produce un campo magnético (Teresa & Serrano, 2018). El campo magnético producido por un electroimán tiene la ventaja de ser más intenso que el de uno producido por un imán permanente y además su intensidad puede regularse. El estátor está formado por bobinas por las que circulará una corriente determinada. Cuando el rotor gira, el flujo del campo magnético a través del estátor varía con el tiempo, por lo que se generará una corriente eléctrica (Teresa & Serrano, 2018). Un motor eléctrico funciona con los mismos principios que los de un generador, pero de forma inversa ya que convierte energía eléctrica en energía mecánica.

1.2.1 Generador eléctrico asíncrono

Un motor asíncrono que funciona excitado por una máquina o fuerza motriz (motor de combustión, caída de agua, entre otras) es la dirección del movimiento del motor y a una velocidad mayor que la de sincronismo, es capaz de producir energía eléctrica cuando su estator recibe una tensión determinada. A estas máquinas eléctricas se le conoce como generadores eléctricos asíncronos (Calderon, 2001). El generador asíncrono es muy simple en su funcionamiento debido a que no necesita un circuito independiente para el campo (no requiere escobillas, excitación DC, entre otras) y no tiene que girar continuamente a una velocidad fija ya que siempre que su velocidad sea ligeramente mayor que la velocidad de sincronismo funcionará como generador (Calderon, 2001).

1.2.2 Generador eléctrico síncrono

El generador síncrono es un tipo de máquina eléctrica rotativa capaz de transformar energía mecánica en energía eléctrica, La razón por la que se llama generador síncrono es la igualdad entre la frecuencia eléctrica como la frecuencia angular, es decir, el generador girará a la velocidad del campo magnético, por lo que a esta igualdad de frecuencias se le denomina sincronismo (Chapman, 2015). Esta máquina funciona alimentando al rotor o circuito de campo por medio de una batería es decir por este devanado fluirá CC., mientras que en el estator o circuito de armadura la corriente es alterna CA (Chapman, 2015).

El generador síncrono está compuesto principalmente de una parte móvil o rotor y de una parte fija o estator, el principio de funcionamiento de un generador síncrono se basa en la ley de Faraday (Chapman, 2015). Para crear tensión inducida en el (estator), se debe generar un campo magnético en el rotor o circuito de campo, esto logra alimentando el rotor con una batería, este campo magnético inducirá una tensión en el devanado de armadura por lo que se obtiene una corriente alterna fluyendo a través de él (Chapman, 2015). Al operar como generador, la energía mecánica es suministrada a la máquina por la aplicación de un torque y por la rotación del eje de la misma, una fuente de energía mecánica puede ser, por ejemplo, una turbina hidráulica, a gas o a vapor. Una vez estando el generador conectado a la red eléctrica, su rotación es dictada por la frecuencia de la red, pues la frecuencia de la tensión depende directamente de la velocidad de la máquina (Chapman, 2015).

Para que la máquina síncrona sea capaz de efectivamente convertir energía mecánica aplicada a su eje, es necesario que el enrollamiento de campo localizado en el rotor de la máquina sea alimentado por una fuente de tensión continua de forma que al girar el campo magnético generado por los polos del rotor tengan un movimiento relativo a los conductores de los enrollamientos del estator (Chapman, 2015). Debido a ese movimiento relativo entre el campo magnético de los polos del rotor, la intensidad del campo magnético que atraviesa los enrollamientos del estator irá a variar el tiempo, y así tendremos por la ley de Faraday una inducción de tensiones en las terminales de los enrollamientos del estator (Chapman, 2015).

Debido a distribución y disposición espacial del conjunto de enrollamientos del estator, las tensiones inducidas en sus terminales serán alternas senoidales (Chapman, 2015). La corriente eléctrica utilizada para alimentar el campo es denominada corriente de excitación. Cuando el generador está funcionando aisladamente de un sistema eléctrico, la excitación del campo irá a controlar la tensión eléctrica generada (Chapman, 2015). Cuando el generador está conectado a un sistema eléctrico que posee diversos generadores ligados internamente, la excitación del campo irá a controlar la potencia reactiva generada (Chapman, 2015).

1.2.3 Tipos de generadores según número de fases

Los generadores eléctricos pueden clasificarse según su número de fases en monofásicos, bifásico y trifásicos.

Generadores monofásicos: Estos generadores producen una sola corriente alterna sin desfases con dos hilos (fase y neutro) en su salida y son utilizados comúnmente en cargas pequeñas como aplicaciones domésticas.

Generadores bifásicos: Estos generadores producen dos corrientes desfasadas 180 grados una de la otra con tres hilos (dos fases y neutro) en su salida. Su uso es menos común que el de los generadores monofásicos y trifásicos debido a su baja eficiencia en comparación.

Generadores trifásicos: Estos generadores producen tres corrientes desfasadas 120 grados una de la otra con 3 o 4 hilos (3 fases y/o 1 neutro dependiendo del tipo de conexión) en su salida. Se suelen utilizar en sistemas de potencia, aplicaciones industriales debido a su mayor rendimiento y eficiencia para grandes cargas de equipos y máquinas.

1.2.4 Partes fundamentales de un generador síncrono

Aunque existen distintos tipos de generadores síncronos, a continuación, se enlistará y detallará las partes fundamentales que forman parte de un generador síncrono:

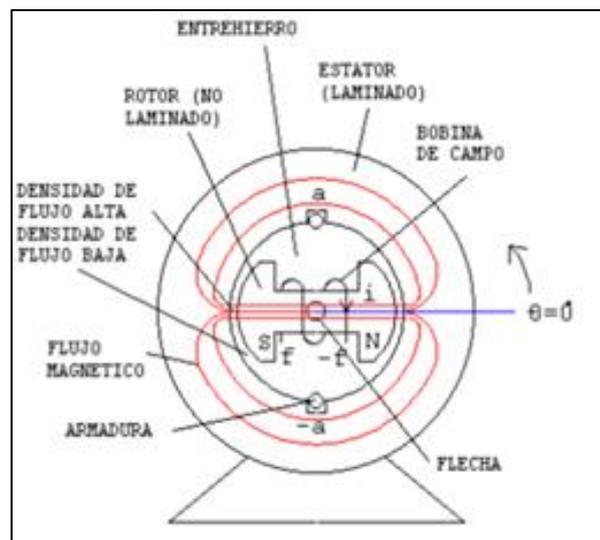


Figura 4, Partes de un generador síncrono.

Estator. Parte fija de la máquina, montada envuelta del rotor de forma que el mismo pueda girar en su interior, también constituido de un material ferromagnético envuelto en un conjunto de enrollamientos distribuidos al largo de su circunferencia. Los enrollamientos del estator son alimentados por un sistema de tensiones alternadas (Chapman, 2015). Por el estator circula toda la energía eléctrica generada, siendo que tanto la tensión en cuanto a corriente eléctrica que circula es bastante elevada en relación al campo, que tiene como función sólo producir un campo magnético para "excitar" la máquina de forma que fuera posible la inducción de tensiones en las terminales de los enrollamientos del estator (Chapman, 2015).

La máquina síncrona está compuesta básicamente de una parte activa fija que se conoce como inducido o estator y de una parte giratoria coaxial que se conoce como inductor

o rotor. El espacio comprendido entre el rotor y el estator es conocido como entrehierro. Esta máquina tiene la particularidad de poder operar ya sea como generador o como motor (Chapman, 2015).

Su operación como alternador se realiza cuando se aplica un voltaje de c.c en el campo de excitación del rotor y a su vez éste es movido o desplazado por una fuente externa, que da lugar a tener un campo magnético giratorio que atraviesa o corta los conductores del estator, induciéndose con esto un voltaje entre los terminales del generador (Chapman, 2015).

El estator a su vez está conformado por algunos elementos importantes, los cuales son: componentes mecánicos y su sistema de conexión. Los componentes mecánicos de un generador síncrono son:

- Carcaza
- Núcleo
- Bobinas
- Caja de terminales

Existen dos sistemas de conexión para los generadores síncronos, los cuales son:

- Sistema de conexión en estrella o Y: Los devanados del estator de un generador de C.A. están conectados generalmente en estrella, en la siguiente figura T1, T2, T3 representan los terminales de línea (al sistema) T4, T5, T6 son los terminales que unidas forman el neutro (Roa, 2019).

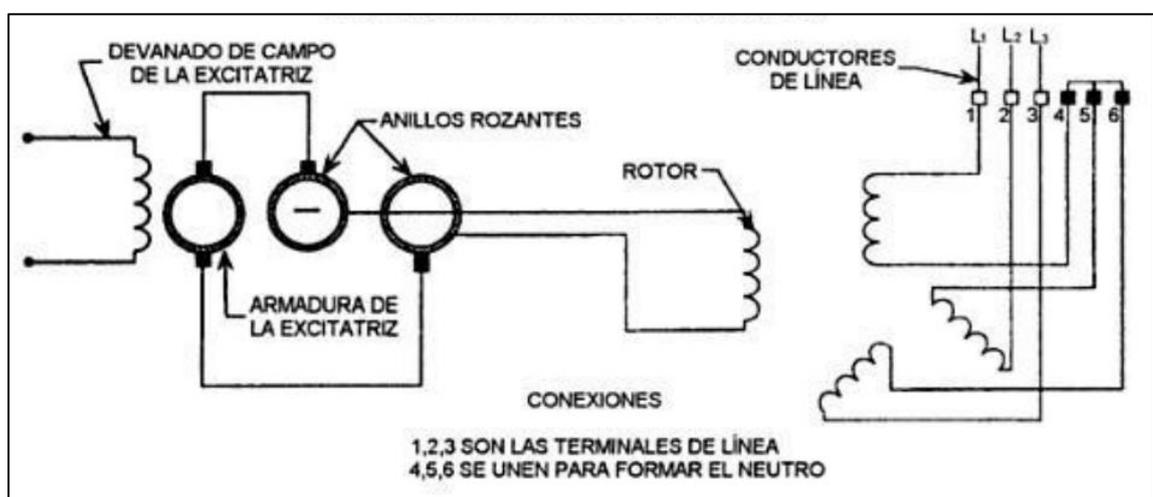


Figura 5. Conexión de un generador conectado en estrella.

- Sistema de conexión delta o triángulo: La conexión delta se hace conectando los terminales T1 a T6, T2 a T4 y T3 a T5, los terminales de línea se conectan a T1, T2 y

T3, con esta conexión se tiene a diferencia de la conexión estrella, un voltaje menor, pero en cambio se incrementa la corriente de línea (Roa, 2019).

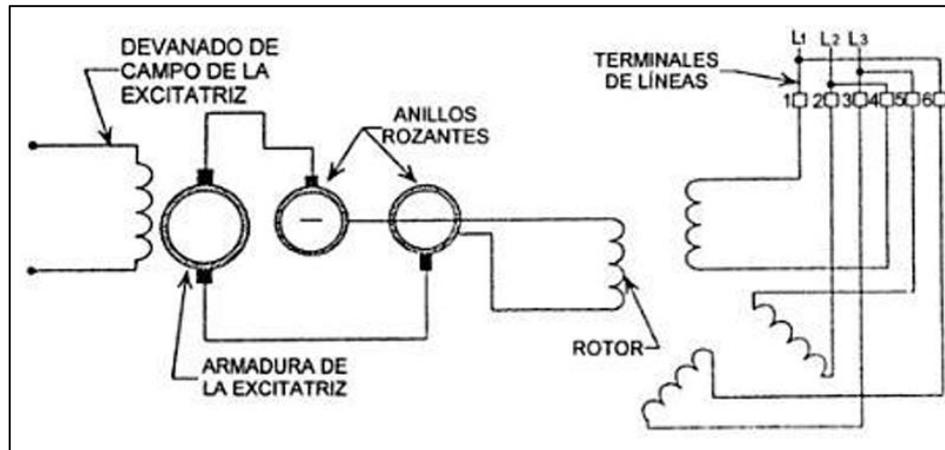


Figura 6, Conexión de un generador conectado en delta.

Rotor. Es la parte de la máquina eléctrica que se encarga del movimiento rotatorio de la misma, está formado de un material ferromagnético envuelto en un enrollamiento llamado "enrollamiento de campo", que tiene como objetivo producir un campo magnético constante, para interactuar con el campo generado por el enrollamiento en el estator del generador (Chapman, 2015). La tensión aplicada en ese enrollamiento es continua y la intensidad de la corriente soportada por ese enrollamiento es mucho más pequeño que el enrollamiento del estator, además de eso el rotor puede contener dos o más enrollamientos, siempre en número par y todos conectados en serie siendo que cada enrollamiento será responsable por la producción de uno de los polos del electroimán (Chapman, 2015).

Sistema de refrigeración o enfriamiento. Como toda máquina eléctrica, un generador produce calor como efecto colateral cuando está en funcionamiento, el mismo que es producido por el efecto Joule en los devanados, por rozamiento, entre otras causas. Por este motivo, es necesario un sistema de enfriamiento, a continuación, se detallaron los más utilizados.

- Generadores enfriados por aire: Este tipo de sistema de enfriamiento se divide en dos tipos básicos: abiertos ventilados y cerrados ventilados con aire y agua o refrigerante. El sistema de enfriamiento abierto ventilado el más común en generadores de baja potencia, ya que el aire que ingresa una sola vez a través del generador gracias al ventilador que está acoplado al rotor enfría lo suficiente los devanados para mantener el correcto funcionamiento del generador. La desventaja de este es que al tomar el aire del ambiente permite inevitablemente que ingresen materias extrañas como el polvo (la cantidad y tipo de materias extrañas dependerán de la ubicación del generador) que

pueden acumularse en las bobinas, interfiriendo la transferencia de calor y afectando negativamente al aislamiento y a la refrigeración (Mario, 2014). Por otro lado, los sistemas de enfriamiento cerrados ventilados con aire, agua o refrigerante son sistemas de enfriamiento cerrados, donde el aire recircula constantemente y se enfría pasando a través del tubo del enfriador hacia un radiador con agua o refrigerante que circula para mantener el aire a una temperatura adecuada. La suciedad y materias extrañas no existen en el sistema ya que el aire que circula siempre es el mismo y está aislado del exterior, y tener un radiador con agua o refrigerante permite que la temperatura del aire puede mantenerse tan baja como se desee (Benavides, 2018).

- Generadores enfriados por gases: El funcionamiento de este tipo de sistema de enfriamiento es en esencia igual que el sistema de enfriamiento cerrado ventilado con aire, agua o refrigerante, la diferencia es que, en lugar de utilizar aire, se emplea otros gases siendo el hidrógeno el más utilizado. Los generadores de mayor capacidad, peso, tamaño y los más modernos, usan hidrógeno para enfriamiento en vez de aire en circuito de enfriamiento cerrado (Benavides, 2018). El enfriamiento convencional con hidrógeno puede usarse en generadores con capacidad nominal aproximada de 300 MVA (Benavides, 2018).
- Generadores enfriados con agua o refrigerante: Pueden lograrse diseños de generadores aún más compactos mediante el uso de enfriamiento con agua directo al devanado de la armadura del generador (Benavides, 2018). Estos diseños utilizan conductos de cobre a través de los cuales fluye agua desionizada. El agua de enfriamiento se suministra vía un circuito cerrado (Benavides, 2018).

Regulador de tensión (AVR): El regulador automático de voltaje, proporciona una excitación al rotor, el rotor debe tener un campo magnético constante en cuanto a la dirección de sus líneas magnéticas (no en cuanto a intensidad del campo) y este se logra excitándolo con corriente directa (alterna rectificadas) la corriente alterna generada por el generador, debe ser de una frecuencia constante 60hz (o la frecuencia de la red); y para eso el rotor siempre gira a la misma velocidad independientemente de que carga este produciendo (se mide en MW) no depende del voltaje, como los requerimientos de carga (consumo de la energía producida) son variables, la generación de MW es variable a frecuencia y voltaje constante, si no tienes un regulador automático de voltaje (llamado AVR en inglés) esto no se puede lograr (Mario, 2014).

Regulador de velocidad (RAS): Antes de explicar su funcionamiento es importante aclarar para evitar confusiones que estos dispositivos con los reguladores de tensión de los alternadores, pues si bien actúan al unísono sobre el grupo, como elementos reguladores que son, sus funciones, aunque relacionadas, están perfectamente delimitadas (Mario, 2014). Este dispositivo se encarga de mantener un equilibrio entre la velocidad de sincronismo (rango de acción) y la carga solicitada, protegiendo al generador contra velocidades excesivas que pudieran surgir, ya sea de por la fuente de la energía mecánica o por la desconexión de carga (Mario, 2014).

Excitatriz: La excitatriz es la encargada de suministrar la tensión y corriente continua para alimentar el rotor de un generador síncrono, y convertir a éste en un electroimán con capacidad en general para regular la intensidad del campo magnético (García, 2019). La resistencia que ofrece el bobinado del rotor es fija, por lo que variando la tensión continua de alimentación se consigue variar la intensidad de la corriente que circula por el rotor, variando así la intensidad del campo magnético de acoplamiento (García, 2019). Según la forma de producir el flujo magnético inductor se puede hablar de algunos tipos de excitatriz.

- **Excitatriz estática:** La resistencia que tiene el devanado del rotor es constante, por lo que cambiando el valor del voltaje continuo de alimentación se puede variar la intensidad de la corriente que transita por el rotor, cambiando así también el flujo del campo magnético de acoplamiento en el generador síncrono. En la excitatriz estática o también conocida como excitatriz de anillos rotativos (escobillas), que son el tipo de excitatriz más comunes, sobre todo en generadores de generaciones anteriores o que tienen un gran tamaño, la tensión se cambia gracias a transformadores, y se rectifica con un rectificador de onda completa, para que de esta manera se pueda obtener una corriente continua rectificada con una tensión y una intensidad máxima determinada. Con la ayuda de componentes electrónicos como pueden ser: diodos, capacitores y rectificadores es posible variar la tensión continua que fue rectificada en principio (García, 2019). Para conectar esta tensión continúa previamente regulada al rotor para alimentarlo, normalmente estará en movimiento, por lo que se utilizan dos anillos concéntricos al eje rotor, cada uno de ellos debe estar conectado a un extremo de los devanados del rotor, y un grupo de escobillas de grafito (comúnmente conocidos como carbones), que es un material que se utiliza gracias a sus propiedades como conductor y además porque se auto

lubricado. Las escobillas se desgastan con el uso del generador, debido a esto se requiere un remplazo de las mismas cada cierto tiempo (Garcia, 2019).

- Excitatriz de imanes permanentes: La excitatriz del tipo imanes permanentes está conformada de uno o varios imanes permanentes, es decir que no requieren tensión de alimentación (ya que son materiales naturalmente magnéticos), sino que al girar son capaces de crear un voltaje en el rotor del generador, el valor de este voltaje depende de la velocidad de giro del rotor con respecto a los imanes permanentes: a más velocidad, mayor tensión (Garcia, 2019). La desventaja es que se pueden regular lo que provoca que no se pueda variar el campo magnético y por consecuencia tampoco se puede variar el voltaje inducido al rotor. Por este motivo casi nunca se utilizan solo imanes permanentes, sino siempre en conjunto con otros tipos de excitatriz para dar una combinación que mejore la eficiencia de esta (Garcia, 2019).

1.3 Tipos de diseño de un generador síncrono

La principal diferencia entre los distintos tipos de generadores síncronos que existen se encuentra específicamente en su sistema de alimentación de corriente continua para la fuente de autoexcitación situada en el rotor. A continuación, se detalló los distintos tipos de diseño de generadores síncronos.

1.4 Generador síncrono del tipo de polos salientes en el estator: El estator está formado principalmente por un conjunto de láminas (que unidas crean el núcleo del generador) de acero al silicio, que tienen la particularidad de permitir que pase a través de ellas el flujo magnético con mucha facilidad; la parte metálica del estator y las bobinas brindan a los polos magnéticos. La particularidad de este tipo de generador es que tiene el inducido en el rotor, esta configuración es propia de máquinas de baja y media velocidad y potencia (Chapman, 2015).

Por esta razón para obtener el voltaje generador, es necesario un sistema de anillos colectores. El número de anillos a utilizar en el generador síncrono va a depender directamente del número de fases con la que se funcione el mismo.

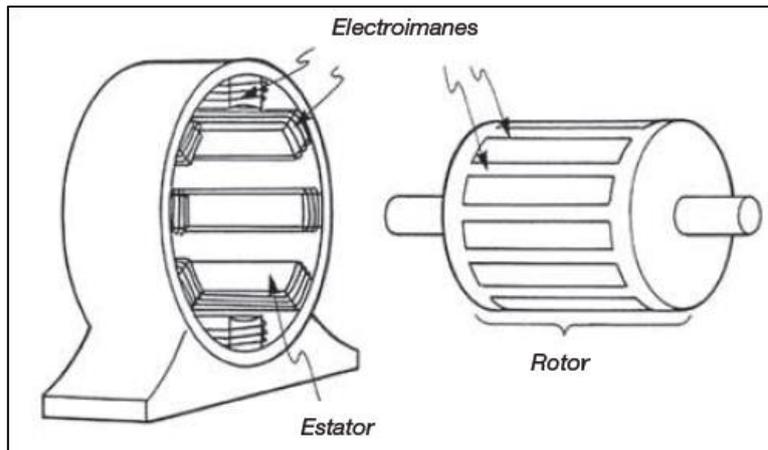


Figura 7, Generador síncrono con polos salientes en el estator.

1.5 Generador síncrono con polos salientes en el rotor: Este generador a diferencia del anterior tiene el inducido en el estator, por tal razón no se necesita un mecanismo de colector de anillos para extraer la tensión generada ya que esta va a encontrarse en la parte externa de la máquina, se necesita únicamente un par de anillos, con la finalidad de ingresar el voltaje de campo, pero esto es de gran ayuda ya que el voltaje de campo es considerablemente más pequeño que la tensión generada, por tal razón este par de anillos van hacer de medidas pequeñas, y así mismo las escobillas no tendrían un tamaño mayor (Chapman, 2015).

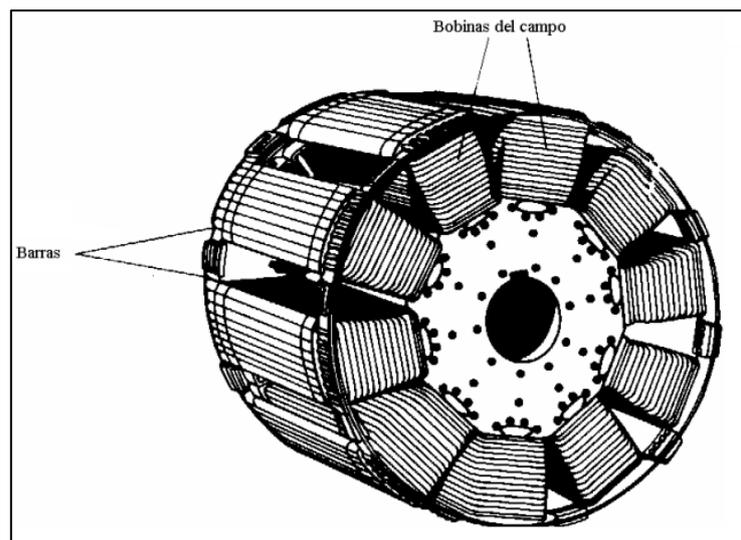


Figura 8, Generador síncrono con polos salientes en el rotor.

1.6 Generador síncrono del tipo sin escobillas: Este tipo de generadores síncronos se utilizan con potencia mediana, y trabaja con los mismos principios que el generador anterior, la diferencia es que se quitan las escobillas y el conmutador. El voltaje del inducido del generador de corriente alterna en los devanados rotatorios se rectifica por medio de diodos montados sobre la estructura rotatoria (Chapman, 2015). El voltaje en corriente continua

producido por los rectificadores rotatorios se aplica directamente a los devanados de campo del generador, el regulador de voltaje controla la corriente de campo para obtener el voltaje deseado en las terminales (Chapman, 2015). Debido a que no presenta ningún contacto mecánico entre el rotor y el estator estas máquinas requieren mucho menos mantenimiento (Chapman, 2015).

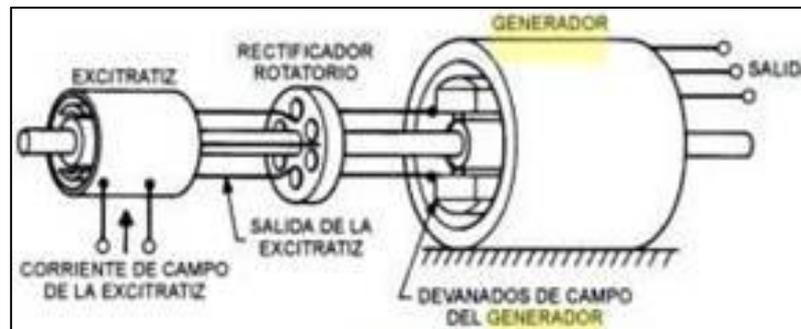


Figura 9, Generador síncrono sin escobillas.

1.7 Circuito Equivalente y diagramas

1.7.1 Circuito equivalente generador síncrono

Los generadores síncronos son los más utilizados en plantas de generación de electricidad ya que la frecuencia depende totalmente de la velocidad de rotación y del número de pares de polos que tiene el generador. El valor del voltaje generado depende de la velocidad, de la excitación de campo y del factor de potencia de la carga (Pernía, 2011).

Para trazar el circuito equivalente, se consideran los siguientes parámetros constitutivos de la máquina:

1. El rotor posee un devanado excitado por corriente continua, que crea el flujo principal ϕ ; se representa con su resistencia y una fuente.
2. La Fem (fuerza electromotriz) inducida en el estator E_0 por el flujo principal ϕ del rotor.
3. La reacción del inducido se origina por los flujos de las corrientes que se representa a través de una reactancia X_i .
4. Las corrientes dispersas que están presentes además de campos magnéticos que no son útiles y que afectan a distintas partes de la máquina síncrona, se los engloba bajo la denominación de “flujos dispersos” ϕ_d , y se representa a través de una reactancia X_d .

5. La resistencia R de los bobinados del inducido R .
6. Una carga Z cualquiera.

El circuito equivalente de un generador síncrono se realizará por fase.

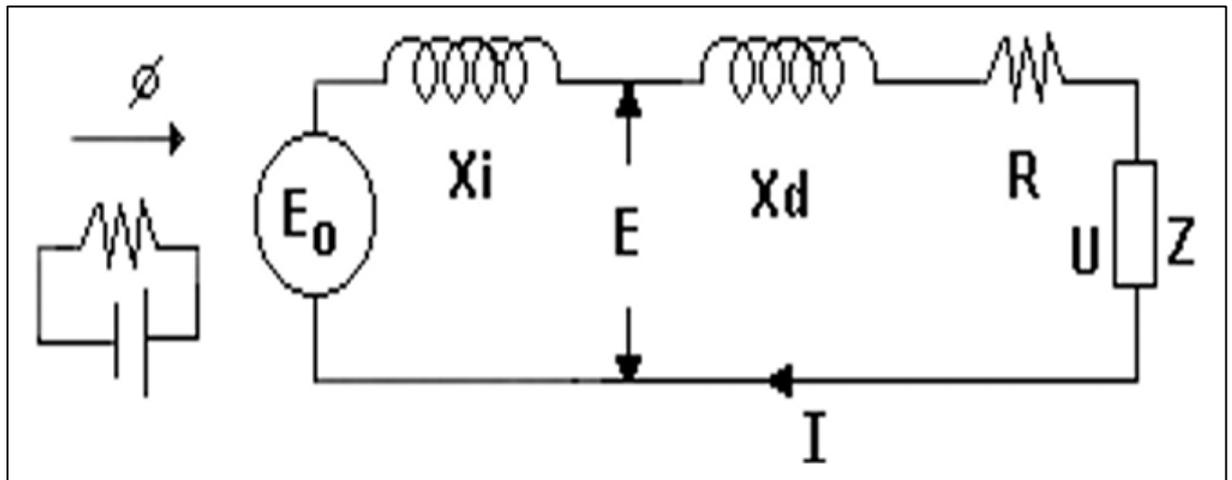


Figura 10, Circuito equivalente por fase completo.

1.7.2 Diagrama de potencia de un generador síncrono

Es importante mencionar que no toda la potencia mecánica o fuerza electromotriz que impulsa a un generador síncrono se convierte en potencia eléctrica que es aprovechada por la máquina. La diferencia entre la potencia de entrada (mecánica) y la potencia de salida (eléctrica) representa las pérdidas en la máquina (Chapman, 2015). En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo de potencia de un generador síncrono (Chapman, 2015). La potencia mecánica de entrada del generador está dada por:

- $P_{entr} = \tau_{ap} \omega_m$ potencia mecánica.
- $P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m$ potencia convertida en potencia eléctrica.
- $P_{conv} = 3E_A I_A \cos \beta$ donde β es el ángulo que existe entre E_A e I_A .
- $P_{sal} = \sqrt{3} V_\phi I_A \cos \theta$ potencia de salida generada línea-línea.
- $P_{sal} = 3 V_\phi I_A \cos \theta$ potencia de salida por fase
- $Q_{sal} = \sqrt{3} V_T I_L \sin \theta$ potencia reactiva línea-línea.
- $Q_{sal} = 3 V_\phi I_A \sin \theta$ potencia reactiva por fase.

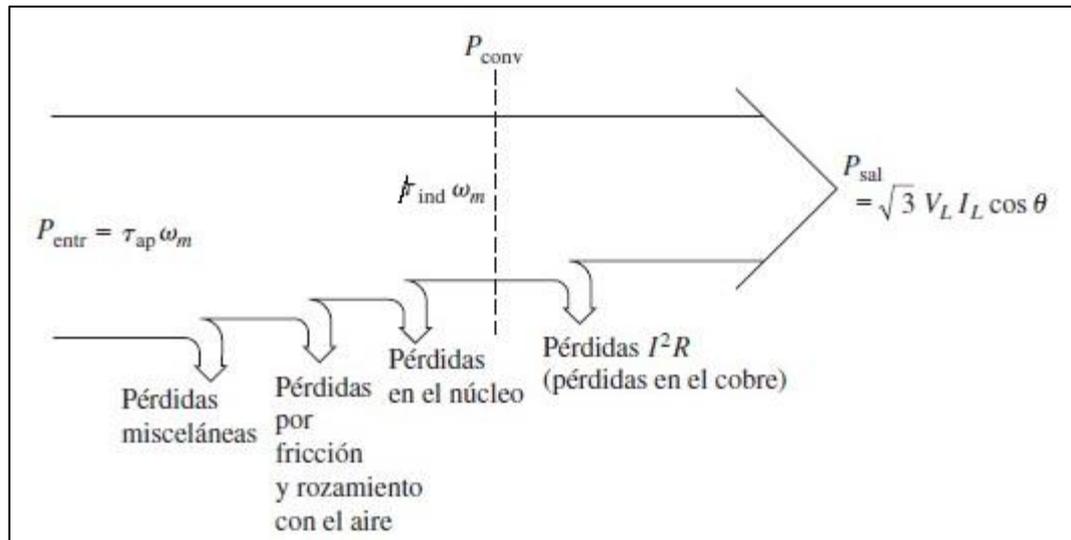


Figura 11, Diagrama par/potencia del generador síncrono.

1.7.3 Operación de generadores eléctricos en paralelo con sistemas de potencia

Todos los generadores necesitan ser impulsados por una fuerza externa, la misma que puede ser un motor primario o motor impulsor, que es la fuente de la potencia mecánica del generador. El motor impulsor más común es la turbina de vapor, pero existen otros tipos de motores que desempeñan esa función en donde podemos incluir a los motores de gasolina o diésel, turbinas de gas, las turbinas hidráulicas e incluso las turbinas de eólicas (Chapman, 2015). La fuente inicial de potencia pierde relevancia ya que todos los motores primarios tienden a comportarse de manera parecida; la relación entre que la potencia que se toma de ellos se incrementa, la velocidad. a la que giran es menor (Chapman, 2015). Normalmente, este decremento de velocidad es no lineal, pero se incluye algún tipo de mecanismo regulador para que la disminución de la velocidad sea lineal con el incremento de la demanda de potencia (Chapman, 2015).

1.7.4 Operación con grandes sistemas de potencia

Cuando un generador síncrono se conecta a un sistema de potencia, a menudo el sistema de potencia es tan grande que ninguna de las acciones del operador del generador tendrá gran efecto en el sistema de potencia (Chapman, 2015). Un ejemplo de este fenómeno es la conexión de un solo generador en la red de potencia en USA, que es sumamente grande y que ninguna acción razonable por parte del operador podrá causar un cambio observable en la frecuencia total de la red. Este concepto se esquematiza en el concepto de bus infinito (Chapman, 2015). Un bus infinito es un sistema de potencia tan grande que su voltaje y frecuencia no cambian

sin importar qué tanta potencia real y reactiva se le demande o se le suministre (Chapman, 2015).

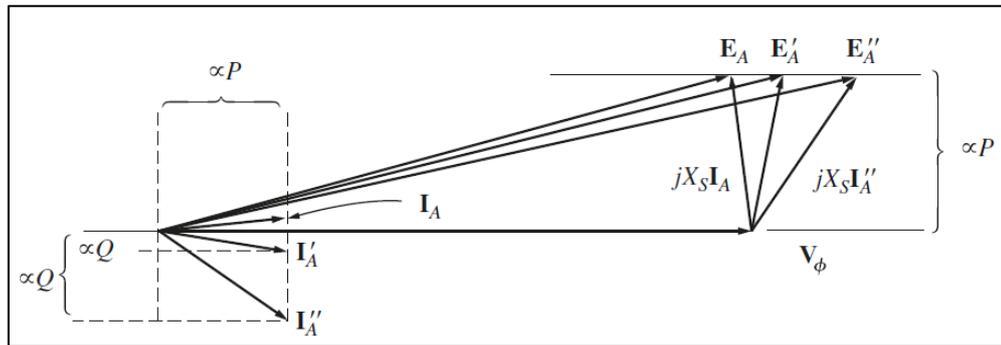


Figura 12, Efecto del incremento en la corriente de campo del mecanismo regulador en el diagrama fasorial de la máquina.

El sistema que se conecta el generador es el que se encarga de controlar la frecuencia y la tensión en las salidas del generador (Chapman, 2015). Los puntos de ajuste del regulador del generador son los que controlan la potencia real que se suministra al sistema por el generador. La corriente de campo en el generador controla la potencia reactiva suministrada al sistema por el generador (Chapman, 2015).

1.7.5 Operación con otros sistemas del mismo tamaño

Cuando un generador trabaja individualmente, las potencias reales y reactivas que son suministradas al generador son constantes y están limitadas a ser iguales a la potencia demandada por el sistema y los puntos de ajuste del regulador y la corriente de campo varían la frecuencia y el voltaje en las terminales (Chapman, 2015). Cuando un generador opera en paralelo con un bus infinito, éste restringe la frecuencia y al voltaje en las terminales a ser constantes y los puntos de ajuste del mecanismo regulador y la corriente de campo varían las potencias real y reactiva (Chapman, 2015).

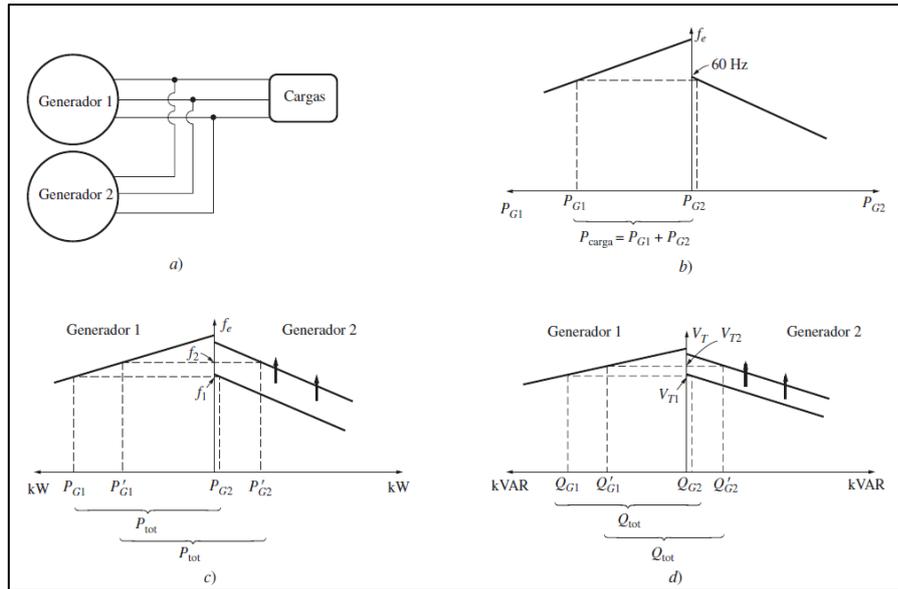


Figura 13, Diagrama de casa en paralelo con un sistema del mismo tamaño.

Por lo tanto, cuando dos generadores operan juntos, un incremento en los puntos de ajuste del mecanismo regulador de uno de ellos incrementa la frecuencia del sistema o incrementa la potencia que suministra ese generador, a la vez que reduce la potencia que suministra el otro (Chapman, 2015).

4.6 Curva de capacidad

La curva de capacidad de un generador síncrono nos indica el límite dentro del cual el generador puede trabajar con normalidad y seguridad. También se conoce como Gráficos de operación o Gráficos de capacidad (Unigal, 2018). La región de operación tiene en cuenta los siguientes parámetros:

- La carga de MVA no debe exceder la clasificación del generador. Este límite está determinado por el calentamiento del inducido del estator por la corriente del inducido (Unigal, 2018).
- La carga de MW no debe exceder la clasificación del motor principal (Unigal, 2018).
- No se debe permitir que la corriente de campo exceda un valor específico determinado por el calentamiento del campo (Unigal, 2018).
- Para un funcionamiento estable o en régimen permanente, el ángulo de carga δ debe ser inferior a 90 grados. El límite de estabilidad teórico de la condición estable ocurre cuando $\delta = 90^\circ$ (Unigal, 2018).

generador conectado a la red eléctrica, su rotación es dictada por la frecuencia de la red, pues la frecuencia de la tensión trifásica depende directamente de la velocidad de la máquina (Ichina, 2017). Para que la máquina síncrona sea capaz de efectivamente convertir energía mecánica aplicada a su eje, es necesario que el enrollamiento de campo localizado en el rotor de la máquina sea alimentado por una fuente de tensión continua de forma que al girar el campo magnético generado por los polos del rotor tengan un movimiento relativo a los conductores de los enrollamientos del estator (Ichina, 2017).

Debido a ese movimiento relativo entre el campo magnético de los polos del rotor, la intensidad del campo magnético que atraviesa los enrollamientos del estator irá a variar el tiempo, y así se tiene por la ley de Faraday una inducción de tensiones en las terminales de los enrollamientos del estator (Ichina, 2017). La corriente eléctrica utilizada para alimentar el campo es denominada corriente de excitación (Ichina, 2017). Cuando el generador está funcionando aisladamente de un sistema eléctrico, la excitación del campo irá a controlar la tensión eléctrica generada. Cuando el generador está conectado a un sistema eléctrico que posee diversos generadores relacionados, la excitación del campo irá a controlar la potencia reactiva generada (Ichina, 2017).

1.8 Otros componentes necesarios

1.8.1 Transformador

Un transformador eléctrico es un dispositivo electromagnético que se utiliza para transferir energía eléctrica entre dos o más circuitos mediante la inducción electromagnética. Consiste en dos bobinas acopladas magnéticamente, generalmente llamadas bobina primaria y bobina secundaria, que comparten un núcleo magnético. El propósito principal del transformador es cambiar los niveles de voltaje y corriente de la energía eléctrica, permitiendo la transmisión eficiente de electricidad a través de líneas de transmisión y la distribución a diferentes niveles de voltaje en una red eléctrica (Rodríguez, 2018).

Usos del Transformador Eléctrico

Transmisión de Energía: Los transformadores son esenciales en la transmisión de energía eléctrica a larga distancia. Permiten aumentar el voltaje en la estación generadora para reducir las pérdidas de energía en las líneas de transmisión, y luego reducir el voltaje nuevamente en las subestaciones cercanas a los puntos de consumo (Rodríguez, 2018).

Distribución de Energía: En la distribución de energía eléctrica, los transformadores se utilizan para adaptar los niveles de voltaje a las necesidades específicas de áreas residenciales, comerciales e industriales. Esto garantiza que la electricidad se entregue a los consumidores a niveles seguros y eficientes (Rodríguez, 2018).

Equipos Electrónicos: En muchos dispositivos electrónicos, como fuentes de alimentación y cargadores, se emplean transformadores para adaptar el voltaje a las necesidades específicas de los componentes electrónicos. Esto permite la utilización segura de dispositivos con diferentes requerimientos de voltaje (Rodríguez, 2018).

Industria: En procesos industriales, los transformadores son esenciales para proporcionar la energía eléctrica necesaria a maquinaria y equipos. Además, se utilizan en sistemas de control y distribución de energía en entornos industriales (Rodríguez, 2018).

Sistemas de Energía Renovable: En la integración de fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, los transformadores son utilizados para conectar y adaptar las salidas de estas fuentes a la red eléctrica existente (Rodríguez, 2018).

Estabilización de Voltaje: Los transformadores también se utilizan para estabilizar el suministro de voltaje, asegurando que la electricidad proporcionada a los consumidores cumpla con los estándares de calidad establecidos (Rodríguez, 2018).

1.8.2 Rectificador AC/DC

Un rectificador de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC) es un aparato electrónico que convierte la corriente alterna de la red eléctrica o de un generador de corriente alterna en corriente continua. Este proceso es esencial para suministrar energía continua a dispositivos electrónicos y sistemas que requieren voltaje constante. Los rectificadores desempeñan un papel crucial en la conversión de la energía eléctrica en distintas aplicaciones, desde fuentes de alimentación de electrónicos hasta sistemas de transmisión de energía (Aguilar, 2015). El proceso de rectificación modifica la forma de onda de la corriente, convirtiéndola de alterna sinusoidal a una forma pulsante. Dependiendo del tipo de rectificador (de onda completa o media onda), la salida puede variar en su suavidad y eficiencia.

5.2.1 Componentes de un rectificador AC/DC

Puente Rectificador: El puente rectificador es un componente clave en un rectificador AC/DC. Generalmente, se utiliza un arreglo de diodos semiconductor para realizar la

rectificación, permitiendo que la corriente fluya en una dirección, convirtiendo así la señal alterna en continua.

Filtros y Capacitores: Para suavizar la salida pulsante del rectificador, se incorporan filtros y capacitores. Estos componentes ayudan a reducir las variaciones en el voltaje y a proporcionar una salida más constante.

Regulación de Voltaje: En algunos casos, se implementan circuitos de regulación de voltaje para garantizar que la salida del rectificador permanezca dentro de los límites especificados, proporcionando una corriente continua constante independientemente de las fluctuaciones en la entrada de corriente alterna.

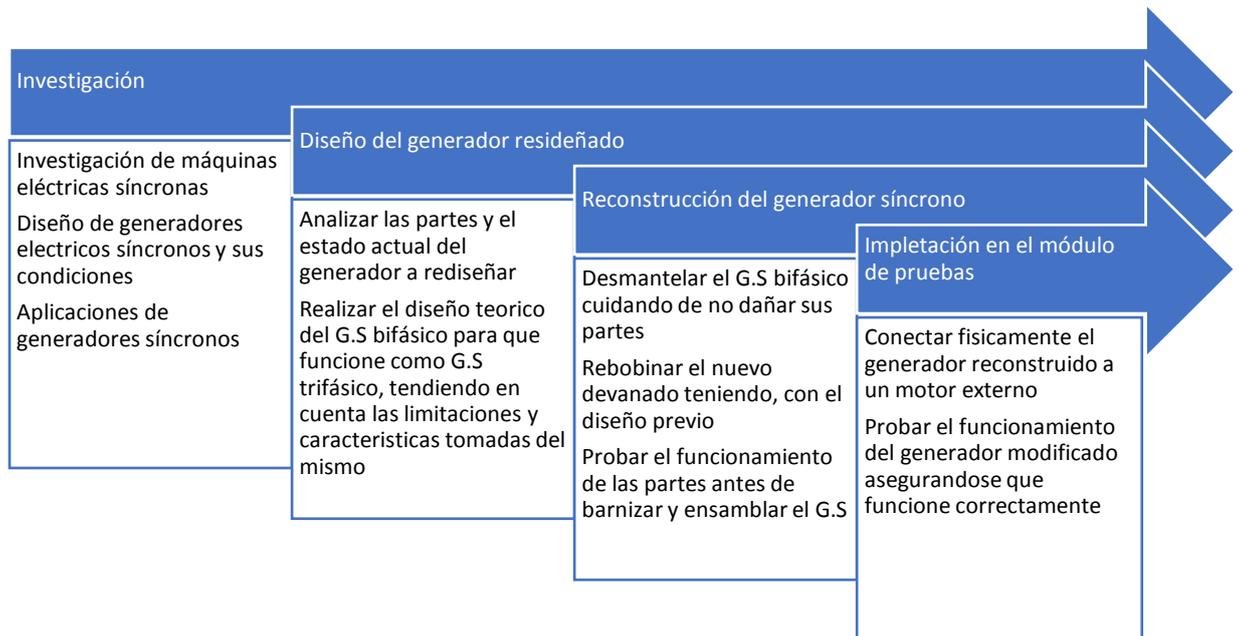
En este capítulo se trataron algunos temas básicos sobre los generadores eléctricos, como teoremas y diagramas que explican su funcionamiento, la clasificación y las partes de los mismos, además de otros temas que son necesarios en este trabajo de grado como transformadores y rectificadores AC/DC con el fin de describir dichos temas antes de utilizarlos en capítulos posteriores.

CAPÍTULO 2

2.1 Diseño del nuevo devanado trifásico

En el presente trabajo de grado se realizará un rediseño de un generador síncrono bifásico para cambiar el bobinado interno y reconstruirlo como un generador trifásico síncrono, manteniendo sus características iniciales para posteriormente montarlo en un módulo de pruebas con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del generador. Para realizar el diseño primero se revisó el generador bifásico para identificar el estado de sus partes y sobre todo conocer las limitaciones físicas del mismo.

2.1.1 Diagrama de flujo del trabajo de grado



2.2 Descripción de metodología

Para realizar el diseño primero se revisó el generador bifásico para identificar el estado de sus partes y sobre todo conocer las limitaciones físicas del mismo. En caso de el G.S bifásico a trabajar, se analizó el estado de cada parte y se obtuvo que sus partes funcionan correctamente a pesar del paso del tiempo, los devanados del estator no tienen fugas, el rotor se mueve correctamente y sus devanados también están en buenas condiciones, el sistema de autoexcitación también funciona correctamente. También se analizó las limitaciones físicas del G.S bifásico, y dado el espacio y el número de ranuras (36) es posible el reacondicionamiento.

Estado bibliográfico

Los generadores síncronos son máquinas eléctricas que se llevan utilizando desde hace décadas, por lo mismo existen muchas fuentes bibliográficas que se mantienen actualizadas. Algunas de las fuentes principales de este trabajo de grado son:

- Synchronous Generators – Ion Boldea
- Electric Machines – D.P. Kothari
- Máquinas Eléctricas – S.J Chapman

La función de este trabajo de grado es demostrar que se puede realizar un generador síncrono funcional rediseñando el mismo para cambiar sus características y que sea funcional, para intentar reducir el desecho de máquinas eléctricas funcionales que no se adaptan a las nuevas necesidades y de esta manera reducir el impacto de crear nuevos equipos y el desecho de equipos funcionales

2.2.1 Materiales para el Nuevo Devanado:

- **Alambre de Cobre:** Se tuvo que seleccionar el calibre adecuado para el devanado, considerando la corriente y la resistencia. En caso de este trabajo de grado se utilizó los siguientes calibres: #17, #18, #19, #20.



Figura 15, Rollos de alambre de cobre para rebobinar.

- **Aislamiento para el Alambre:** Para asegurar el trabajo de grado se contó con materiales aislantes, como el papel aislante y barniz para prevenir el movimiento de los devanados, cortocircuitos y pérdidas eléctricas. Además, para amarrar se utilizó un hilo aislante para asegurar todos los devanados.



Figura 16, Barniz aislante.

2.2.2 Herramientas de Construcción:

- **Herramientas de Bobinado:** Herramienta de bobinado manual para rebobinar el nuevo devanado de manera precisa.



Figura 17, Bobinadora manual.

- **Equipos de Soldadura:** Se utilizó una soldadora para soldar partes a la estructura metálica del módulo además de cautín y estaño para asegurar los empalmes de las diferentes conexiones del G.S trifásico.
- **Herramientas de Medición:** Se utilizó un multímetro, una pinza amperométrica y un comprobador de voltaje para comprobar el funcionamiento del generador.

2.2.3 Materiales para Pruebas Experimentales:

- **Motor impulsador:** Para evaluar el rendimiento del generador en condiciones reales. Se debería utilizar un motor trifásico con una velocidad de 3600 RPM.

$$f = \frac{P * N}{120}$$

Teniendo en cuenta que la potencia del GS bifásico es de 6.5 Hp, se utilizará un motor impulsor trifásico de 7.5 Hp a 3485 RPM. La velocidad del motor impulsador se reduce ya que es un motor asíncrono.



Figura 18, Placa de datos del motor impulsador.

2.2.4 Materiales de Documentación:

- **Papel, lápiz, celular y computadora:** Para documentar con apuntes y fotografías el proceso de diseño, reconstrucción y resultados de pruebas del G.S trifásico y del montaje del módulo de pruebas.

2.2.5 Materiales de Seguridad:

- **Equipos de Protección Personal (EPP):** Guantes dieléctricos, gafas de seguridad, botas dieléctricas y mandil para evitar accidentes durante el proceso de reconstrucción y montaje del módulo.
- **Equipos de Extinción de Incendios:** En caso de que se realicen pruebas que puedan generar calor o chispas.

2.2.6 Materiales para Construcción de Prototipo:

- **Materiales Estructurales:** Una base sólida para poder realizar el módulo de pruebas, con empaques de goma entre el generador/motor y la estructura que minimice las vibraciones del módulo cuando esté en funcionamiento.
- **Poleas y banda:** Para impulsar el generador, es decir para transmitir el movimiento del motor al generador, se decidió utilizar un sistema de poleas 5.5 pulgadas cada una con doble banda.

- **Tablero de control:** Se utilizó un tablero de 30cmx30cm para realizar el control del módulo, en el cual se encontrarán las protecciones y demás circuitos del módulo de pruebas, además de los plug bananas en la tapa exterior para realizar las distintas conexiones en el módulo de pruebas.
- **Protecciones:** Disyuntor trifásico de 32 A para proteger el motor y un disyuntor monofásico de 16 A para protección del circuito monofásico del módulo.
- **Componentes Adicionales:** Transformador reductor, conectores tipo ojo, plug bananas, fuente variable DC, riel, canaleta, pernos y tornillos, entre otros.

2.3 Datos iniciales del G.S bifásico

Para empezar el diseño del nuevo devanado se realizó una revisión de las partes del G.S bifásico para determinar el estado de las mismas, para eso se desensambló al generador con cuidado debido al peso del mismo y se observó lo siguiente:

De derecha a izquierda el rotor cuenta con un devanado de generación en corriente alterna, un rectificador AC/DC que alimentan a los dos polos con corriente continua generando un electroimán en el mismo. Los rodamientos del rotor se encontraban en buen estado.



Figura 19, Condición inicial del rotor del G.S bifásico.

En el estator se encontraban tres devanados, los dos principales están desfasados a 180 grados y el tercero que es el devanado de la excitatriz estaba en encima de uno de los principales. Al

fondo de la figura 18 se puede observar el estator secundario de la excitatriz que induce un campo magnético al devanado de generación de corriente alterna del rotor.



Figura 20, Condición inicial del estator del G.S bifásico.

En el tablero de conexiones se encontró el circuito de autoexcitación, se lo puede definir como un sistema AVR antiguo que utiliza el devanado de la excitatriz para alimentar el estator secundario en el estator y así cerrar el circuito del G.S bifásico.



Figura 21, Tablero de conexiones y autoexcitación del G.S bifásico.

2.4 Diseño del nuevo devanado

Con los datos obtenidos se procedió a diseñar un nuevo devanado que aborde las limitaciones identificadas y permita la operación trifásica del generador. También se consideró la topología del devanado, la conexión de las fases, el número de vueltas, y otros parámetros eléctricos relevantes.

Es importante describir que las ranuras están separadas física y eléctricamente por 180 grados, de tal manera que cuando el flujo que viene del polo norte llega al lado A-1 del alambre, el flujo que retorna al polo sur regresa al lado A-2 del alambre, obteniéndose como resultado la generación de un valor máximo de tensión entre A-1 y A-2. En el momento en que los polos norte y sur están perpendiculares con respecto a los conductores A-1 y A-2, no hay líneas de fuerzas que crucen con los conductores por lo que la diferencia de tensión entre A-1 y A-2 es cero. Cuando el rotor completa una revolución 360 grados se puede decir que ha completado un ciclo.

Para que un generador sea trifásico, deben tener tres devanados en el estator que estén desplazadas entre sí 120°, a cada uno de los devanados o conjunto de bobinas se los conoce como una “Fase”, de manera que se designan tres fases como: Fase A, Fase B y Fase C.

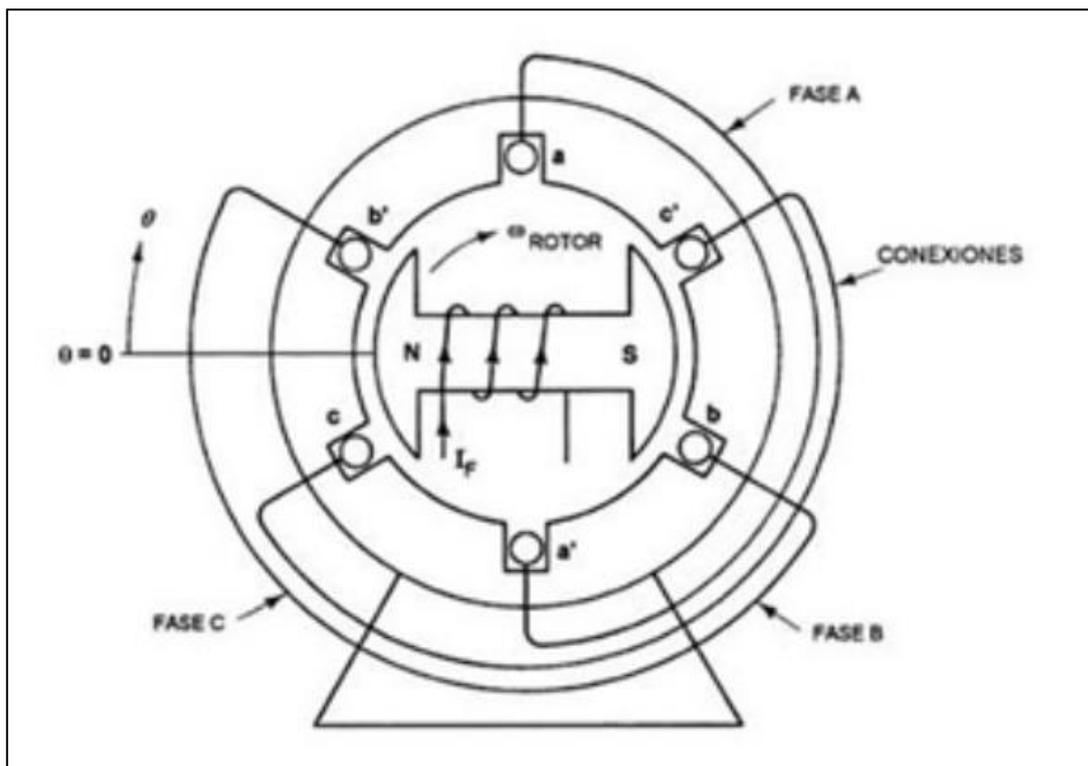


Figura 22, Bobinados de generador trifásico.

La magnitud de la tensión en cada fase se calcula con la siguiente expresión:

$$E_{max} = B_m * l * \omega$$

Donde:

B_m : Densidad de flujo máximo producido por el campo del rotor, expresado en tesla.

l : longitud de ambos lados de bobina en el campo magnético en metros.

ω : velocidad angular del rotor ($2\pi f$)

Antes de empezar a realizar el diseño, fue necesario hacer un levantamiento de las características del GS bifásico, y se obtuvo los siguientes datos:

2.4.1 Datos del GS bifásico

Generador síncrono bifásico de 6.5 HP (4.8471 kW), con 28cm de diámetro y 9cm en el núcleo, 31.6cm de diámetro de la carcasa, con 36 ranuras y 5 puntas. Los pasos de los devanados estaban separados y no montados y tenían los siguientes pasos:

Pasos	# de vueltas
1-19	6
1-10	25
1-12	50
1-14	50
1-16	50
1-18	50

Tabla 1, Pasos del generador síncrono bifásico.

Y, cortando un trozo de alambre de los devanados, quitando el esmalte y con ayuda de un calibre, se determinó que el calibre del conductor utilizado era #17 AWG.

2.4.2 Diseño del nuevo devanado

Para realizar el diseño de los nuevos devanados, se utilizó la información recolectada del GS bifásico. Para calcular el calibre del conductor, se determinó el área de cobre que debe pasar por las ranuras respecto a el calibre #17 y el número de vueltas.

Considerando eso, se determinó que se utilizará 4 alambres de cobre de los calibres #17, #18, #19, #20 AWG para llegar a un área de 3.035 mm². Se utilizaron 4 conductores debido al tamaño de las ranuras, para poder introducir el área de cobre necesaria.

Con el calibre del conductor determinado, para calcular el número de vueltas se toma como base el número de vueltas de cada paso y se dividió para el número de puntas 5, que es un dato que también se levantó del GS bifásico. Para el devanado de la excitatriz del generador reconstruido, se mantuvo la misma configuración del generador anterior. Con lo que así se determinó los siguientes pasos:

Pasos	# de vueltas				
1-19	6				
1-10	5				
1-12	10				
1-14	10 </tr <tr> <td>1-16</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>1-18</td> <td>10</td> </tr>	1-16	10	1-18	10
1-16	10				
1-18	10				

Tabla 2, Pasos del generador síncrono trifásico.

Con los pasos anteriores se realizó el siguiente diagrama de los devanados en el estator, donde se aprecian los tres devanados principales y el devanado de la excitatriz.

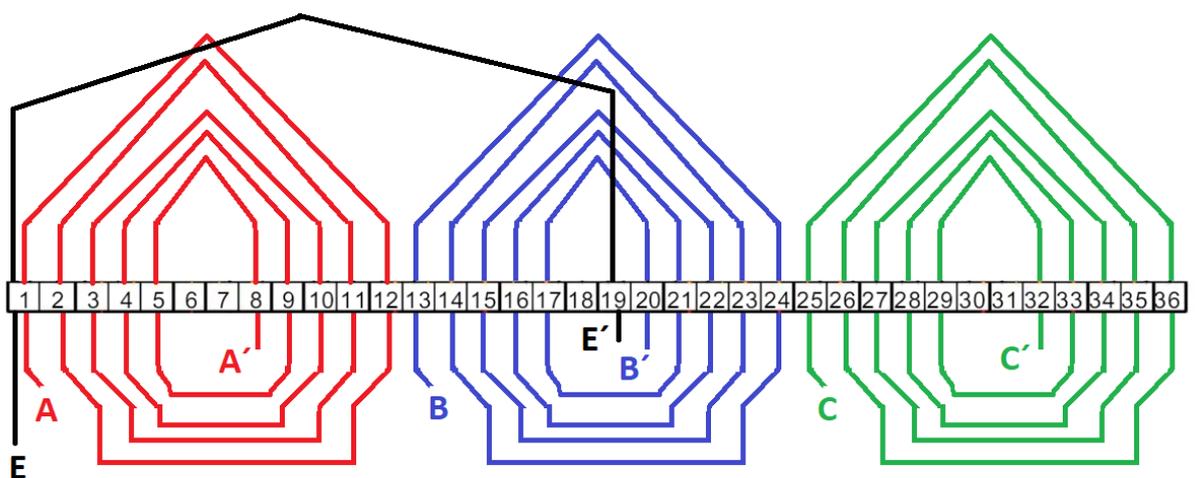


Figura 23, Diagrama de devanados.

Ahora en la figura 26 se muestran los devanados colocados en el estator y se puede apreciar que están desfasados 120 grados físicamente una de otra en las 36 ranuras del núcleo del G.S.

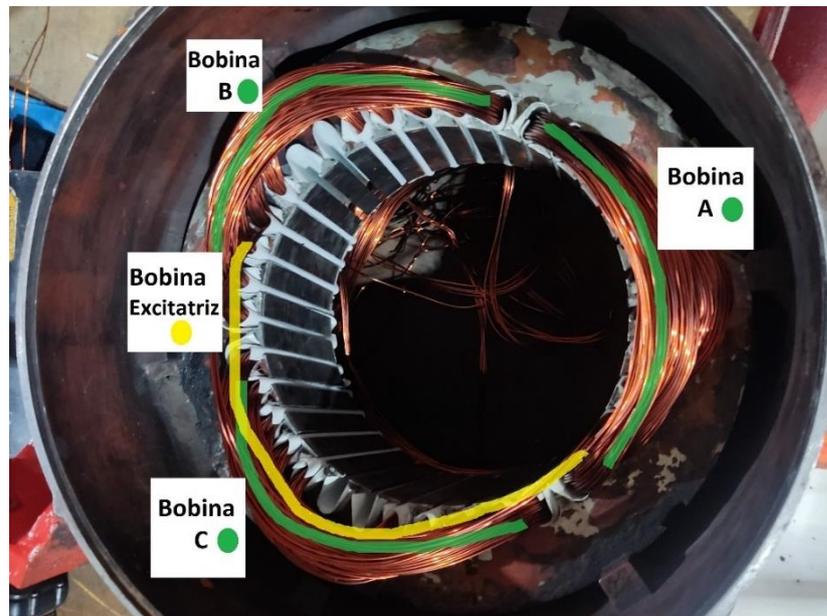


Figura 24, Ubicación física de los devanados en el estator.

2.5 Transformador reductor

Para diseñar el transformador se necesitó tres datos fundamentales: voltaje en el devanado o bobina primaria, voltaje en el devanado o bobina secundaria y la corriente máxima del devanado o bobina secundaria.

El transformador utilizado tiene una entrada de 120 V y dos devanados de salida, 24V y 12V tap central con una corriente máxima de 5 A, y el segundo devanado tiene una salida de 5V con una corriente máxima de 10 A.



Figura 25, Transformador reductor.

2.6 Rectificador AC/DC

Para alimentar el estator secundario se utilizará el transformador, pero el estator secundario necesita corriente continua por lo que hace falta rectificar la salida del transformador para poner a alimentar el mismo.

Para lo cual se utilizó un rectificador de onda completa KBPC2010 de 50 A con un disipador de calor para evitar sobrecalentamientos y unidos con pasta térmica para mejorar la conductividad del calor.



Figura 26, Rectificador AC/DC.

En este capítulo se realizó una revisión de los componentes del generador síncrono bifásico para poder realizar el diseño del nuevo devanado trifásico con los datos del generador anterior, además se describió la metodología utilizada y los materiales necesarios para realizar la reconstrucción del nuevo generador síncrono trifásico para posteriormente montarlo en el módulo de pruebas

Capítulo 3

Después de reconocer y revisar las partes y el estado actual del generador bifásico y con el diseño del nuevo devanado trifásico, se procedió a realizar el rebobinado del GS bifásico con el fin de que funcione como un GS trifásico. Después de reconstruir el generador se procederá a montarlo en un módulo para realizar pruebas de funcionamiento.

3.1 Diseño detallado del nuevo devanado

El generador inicialmente tenía las siguientes características:

- GS bifásico con una potencia de 6.5 HP (4.8471 kW).
- Las medidas físicas del GS son 28cm de diámetro y 9cm en el núcleo con 36 ranuras, 31.6cm de diámetro en la carcasa.
- Los devanados del GS bifásico estaban bobinados con un alambre #17 AWG.
- Los devanados tienen los siguientes pasos:

Pasos	# de vueltas
1-19	6
1-10	25
1-12	50
1-14	50
1-16	50
1-18	50

Tabla 3, Pasos del generador síncrono bifásico.

Ahora con los datos anteriores se realizó el diseño del nuevo devanado trifásico del generador.

3.1.1 Selección de materiales y componentes

Para realizar este trabajo de grado fue necesario el uso de materiales y herramientas, las mismas que se detallaran a continuación.

- Alambre de cobre de calibres #17, #18, #19, #20 AWG
- Conductor de conexiones calibre #14 AWG
- Bobinadora manual
- Cíncel y martillo
- Estructura metálica
- Acoples de doble banda para GS reconstruido y motor impulsador de 42 mm y 28mm respectivamente
- Bandas de goma 17530

- Estilete
- Guantes
- Gafas

3.2 Proceso de construcción del prototipo

Con el reconocimiento del estado actual de las partes del GS bifásico, se procedió a desensamblar cuidadosamente todas las partes, y el centro de atención fue en principio el estator.

1. Con las bobinas al descubierto se procedió a quitar cuidadosamente el aislamiento de estas cuidadosamente intentando no dañar los alambres de cada uno de los devanados.



Figura 27, Estado inicial del estator con su aislamiento.

2. Cuando las bobinas estén sin aislante, se procedió a contar los conductores de cada uno de los pasos de las bobinas además se corta un trozo pequeño del alambre para quitarle el esmalte y medir su diámetro para conocer el calibre del conductor que fue utilizado en cada devanado.



Figura 28, Conductores de los devanados al descubierto sin aislante.

- Después con ayuda de un cincel y un martillo se cortan los conductores desde la base del núcleo, cuidando no dañar las chapas de este. Posteriormente, con todas las ranuras vacías se realizó una limpieza profunda de todo el núcleo, empezando por limar cada una de las ranuras para quitar la suciedad que tenía acumulada el GS y también para retirar todo rastro del papel aislante que se aún se encontraba pegado en las ranuras. Finalmente, se utilizó un paño y tiñer para limpiar completamente cada una de las ranuras.



Figura 29, Núcleo limpio sin devanados.

- El siguiente paso fue aislar las ranuras del núcleo con papel aislante cortado a medida según el tamaño de la ranura para evitar el contacto directo entre los devanados y el núcleo del G.S y de esta manera evitar cortocircuitos y sobrecalentamientos cuando el generador esté en funcionamiento.



Figura 30, Ranuras del núcleo aisladas con papel aislante.

- Después de aislar las ranuras, con ayuda de una bobinadora manual y con el diseño del devanado, se bobinó los nuevos devanados de 5 bobinas cada uno y con 4 conductores de calibres: #17, #18, #19, #20 AWG para llegar al área de cobre indicada en el diseño.

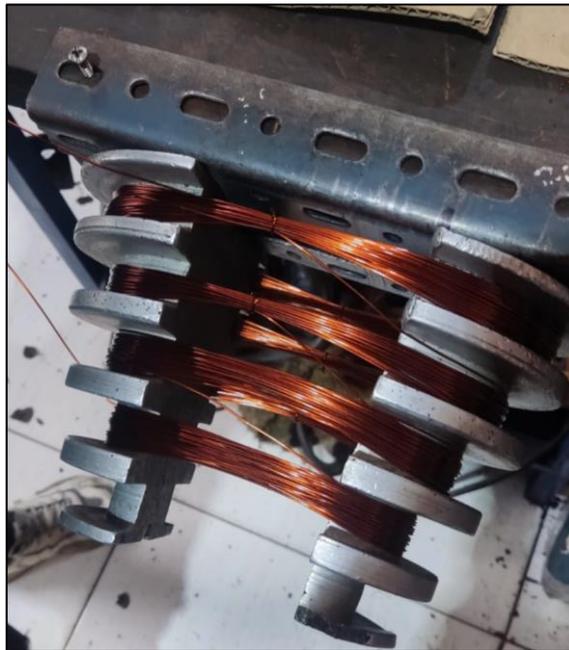


Figura 31, Bobinadora manual con el nuevo devanado.

- Con los devanados listos, se los introdujo en las ranuras con los pasos correspondientes al diseño, y sobre todo con un desfase físico de 120 grados entre cada uno de los tres devanados. También se rebobino el devanado de alimentación de la excitatriz y se lo coloco en la misma posición que tenía inicialmente, puesto que la alimentación de la misma debe ser igual. Pero antes de colocar este último devanado, se aisló con papel en la ranura correspondiente, antes de colocar todas las tapas plásticas en las ranuras ocupadas.



Figura 32, Devanados colocados y sellados con tapas de plástico en cada ranura.

7. Con los devanados colocados, se realizó el amarre de las bobinas del lado contrario al de las conexiones, aislándolas entre si con papel aislante. Posterior a eso se quitó el esmalte de las puntas de cada devanado, se aisló las puntas con un espaguete, después se soldó a un conductor #14 AWG y se realizó las conexiones en los bornes del GS trifásico, para finalmente terminar de amarrar y sujetar los devanados con los conductores de las conexiones. Con las bobinas colocadas y con el cable soldado se procedió a amarrar las bobinas de ambos lados para mantenerlas fijas al núcleo del generador.



Figura 33, Devanados amarrados al núcleo del generador.

8. Con los devanados amarrados, se procedió a barnizar todos los devanados y las ranuras para evitar movimientos en el funcionamiento del generador y además para reducir las pérdidas eléctricas ya que se eliminó los espacios entre alambres con el barniz.



Figura 34, Colocando barniza en los devanados.

9. Con el barniz seco después de un día, se realizaron pruebas de continuidad en todas las bobinas, la carcasa del generador para verificar que no exista continuidad entre ninguna de las mismas. Antes de armar el generador con las partes listas, por la antigüedad del generador la punta de una de las bobinas de la excitatriz se quebró y se necesitó rebobinar una de las seis bobinas para poder armar el generador. Se retiró las protecciones de la bobina para retirar el alambre y contar las vueltas de esta bobina (123 vueltas), y con un calibre se determinó que el calibre de este es #17 AWG. Con la bobina quitada se limó el núcleo y se limpió con alcohol para quitar toda la suciedad antes de colocar la bobina nueva.



Figura 35, Excitatriz sin una bobina.

10. Teniendo los datos, se rebobinó con ayuda de un molde de madera para que el devanado quede apretado y no se mueva, posteriormente después de aislar el núcleo con papel aislante, se coloca la bobina con ayuda de alicates de presión para acomodar correctamente el nuevo devanado antes de conectarlo. Con el devanado colocado, antes de volver a atornillar a la tapa se procedió a barnizar y amarrar la nueva bobina para asegurar que no se moverá cuando esté completamente montado.



Figura 36, Excitatriz barnizada y amarrado.

11. Posteriormente se volvió a colocar la excitatriz en la tapa posterior del generador, volviendo a comprobar la continuidad entre devanados, núcleo y carcaza para evitar fallos, y también se aseguró que la excitatriz no rozara con el rotor, debido a que se cambió un devanado para lo cual se utilizó pinzas de presión y barniz.



Figura 37, Preparando excitatriz antes de armar el GS trifásico.

12. Después con todas las partes listas se armó el GS trifásico cuidadosamente, debido al gran peso de este, se consideró que la mejor manera de armar era de forma vertical para que coincidieran correctamente las partes sin dañarlas en el proceso. Con el GS trifásico

armado se debe comprobar que el giro del rotor no roce con ninguna parte, ya sea el estator, excitatriz o los conductores, ya que eso puede dar problemas posteriormente.

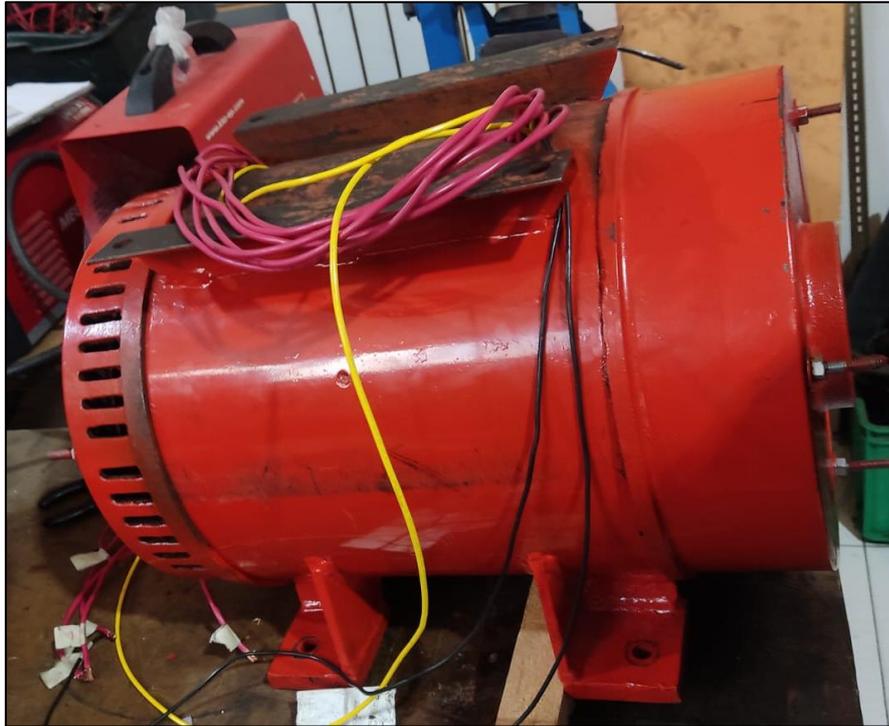


Figura 38, GS trifásico armado completamente.

13. Para armar el módulo se utilizó una estructura metálica que fuese rígida y se soldó barras en la parte inferior donde irán colocados con pernos el generador reconstruido y el generador trifásico impulsor. Se decidió colocar tanto el generador como el motor en la parte inferior de la estructura para reducir su centro de gravedad y de esta manera reducir las vibraciones de este. Con ayuda de una báscula industrial se midió que el peso de del GS reconstruido es de 127kg y el motor trifásico según su placa de datos pesa 43kg por lo que el traslado del módulo sería complicado, por lo que se decidió colocar ruedas de 360 grados que soporten al menos 200kg cada una y para aumentar la firmeza del módulo, entre la estructura y las ruedas, se soldó una platina de tol de 3mm para aumentar la superficie de contacto, ergo la superficie de soldadura.



Figura 39, Estructura soldada con ruedas de 360 grados.

14. Después se ubicó el GS trifásico y el motor impulsor en la estructura alineando sus ejes sobre las barras inferiores para marcar en las mismas el lugar donde se perforará para anclar con pernos las máquinas a la estructura. Con las máquinas fijadas en la estructura se procedió a colocar acoples de dos bandas de 42mm para el generador y de 28mm para el motor. Antes de colocar los acoples se limó los mismos para eliminar rebabas y para asegurarlos se utilizó chavetas a medida para cada máquina y para introducir los acoples se utilizó un mazo y un pedazo de madera para martillar sin dañar los mismos.



Figura 40, GS trifásico y motor impulsor con sus respectivos acoples.

15. Con los acoples instalados se colocó las dos bandas de goma 17530 para transmitir el movimiento del motor impulsor al GS reconstruido. Se utilizaron dos bandas debido a que la velocidad que debe alcanzar el GS es de 3600rpm.



Figura 41, Bandas de goma colocadas en los acoples.

16. Con las bandas instaladas se conectó el circuito de autoexcitación del GS reconstruido a una fuente DC variable de 3 amperios con 6 voltios y se alimentó el motor impulsor para realizar pruebas y mediciones de voltaje en conexiones estrella y triángulo. Las mediciones que se tomaron fueron las siguientes:

Conexión	Estrella	Triangulo
VAB	142.0 V	85.45 V
VBC	140.7 V	86.96 V
VAC	141.8 V	86.3 V
VAN	86.9 V	-
VBN	87.09 V	-
VCN	86.54 V	-

Tabla 4, Mediciones del GS trifásico con fuente DC variable.

Después de verificar el correcto funcionamiento de los devanados y del estator secundario que se rebobinó, para realizar la siguiente prueba se creó un transformador de 100W reductor con salidas de 12V y 24V con tap central a 5 amperios y una de 5V a 10 amperios. Con ayuda de un rectificador AC/DC KBPC5010 con capacidad de 50 amperios, y las mediciones fueron las siguientes:

Conexión	Estrella	Triangulo
VAB	173.04 V	102.02 V
VBC	173.47 V	103.17 V
VAC	172.87 V	101.58 V
VAN	101.14 V	-
VBN	100.6 V	-
VCN	102 V	-
VE	17 V	17 V
VR	13.4 V	13.4 V

Tabla 5, Mediciones del GS trifásico con transformador autoeditado.

La frecuencia del GS trifásico en la última prueba fue de 52.12 Hz debido a que el motor impulsor es asíncrono, por ende, la velocidad que alcanza es de 3485 RPM y además se pierde fuerza electromotriz en las poleas ya que ambas son de 5.5 pulgadas.

17. Con las pruebas realizadas se armó el tablero de control en un gabinete de 30cmx30cm.

Se instaló un disyuntor trifásico de 32 amperios para proteger el motor impulsor y un disyuntor monofásico de 16 amperios para proteger la fuente variable y el transformador.

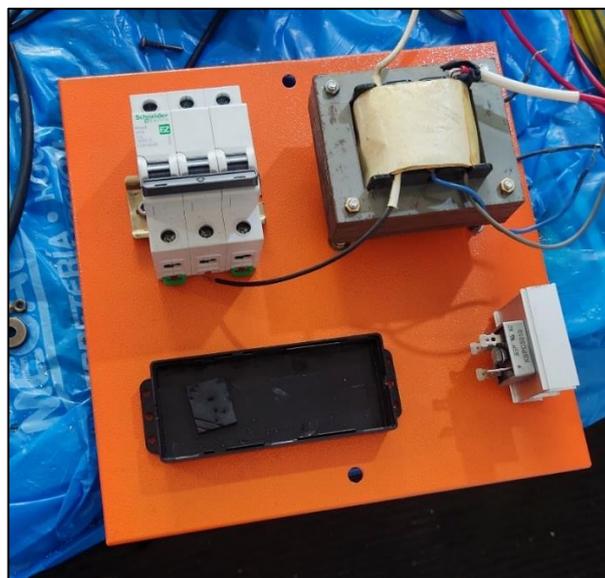


Figura 42, Armando tablero de control.

Se perforó la tapa para colocar los plug bananas y las borneras de conexión del GS trifásico. También se diseñó un sticker a medida con los datos y rótulos de las partes del módulo de pruebas.

18. Finalmente se pintó la estructura del módulo y el motor impulsor con pintura aislante y se conectó el tablero a la estructura.



Figura 43, Módulo de pruebas listo.

3.2.1 Consideraciones de seguridad

Para asegurar que el GS trifásico trabaje de forma segura, se tuvo en cuenta los siguientes parámetros:

- Limpieza y mantenimientos de las partes del generador antes de su reconstrucción para asegurar el correcto funcionamiento de las partes.
- Correcto aislamiento del núcleo y de las bobinas para evitar un mal funcionamiento del generador.

3.2.2 Pruebas preliminares del prototipo

Revisión de bobinas, pruebas de continuidad entre la carcasa, núcleo y devanados para asegurar el correcto aislamiento de cada parte.

Pruebas con autoexcitación y excitación independiente para probar el funcionamiento de todas las bobinas y partes del generador reconstruido.

Para asegurar el módulo se pintó todo con pintura aislante para asegurar el correcto funcionamiento de las partes.

3.2.3 Evaluación del rendimiento del prototipo

El rendimiento del GS trifásico fue 86.667% en base a la frecuencia de 52 Hz que se alcanzó y el valor de 60 Hz. No se pudo alcanzar ese valor debido al motor de excitación las pérdidas mecánicas en el sistema de poleas.

3.3 Conclusiones

El rediseño de los devanados de un generador es posible de implementar teniendo en cuenta las limitaciones físicas del mismo tales como el número y tamaño de las ranuras en el núcleo, el sistema de excitación del generador y el espacio disponible en la carcasa y estator ya que al amarrar las bobinas no debe existir ningún rozamiento entre el estator y el rotor.

Al ser un módulo de pruebas que se centra en el cambio de los devanados para su funcionamiento como generador trifásico, por este motivo se instaló fuentes externas para la autoalimentación para poder realizar pruebas y observar cómo cambia el voltaje generado al cambiar el voltaje y corriente inducido en el estator secundario.

Fue necesario realizar pruebas de ensayo y error para obtener los datos necesarios para la reconstrucción del GS trifásico, además de que con ayuda de estas pruebas se armó el tablero con el fin de realizar estas pruebas de forma controlada para observar el comportamiento de cada una de las partes del generador síncrono trifásico que fue reconstruido.

3.4 Recomendaciones

Se recomienda utilizar un arrancador suave para el motor de excitación para controlar la corriente y la velocidad de este para llegar a las 3600RPM necesarias, o cambiar la relación de tamaño de las poleas y las bandas para aumentar la velocidad de giro del GS trifásico.

Se recomienda utilizar un motor de combustión o un motor trifásico síncrono para llegar a la velocidad requerida de 3600RPM para que el GS trifásico llegue a los 60Hz requeridos para un sincronismo con la red en caso de que se lo quiera utilizar de esta manera.

Se recomienda utilizar un acoplamiento tipo matrimonio entre el motor de excitación y el generador para reducir las pérdidas de fuerza electromotriz que existen en el sistema de poleas y bandas.

Se recomienda realizar una caracterización del generador síncrono trifásico en un futuro para obtener una placa con todos los datos del generador.

Referencias

- Aguilar, J. (2015). *Electrónica de Potencia*. Jaen: Universidad de Jaén.
- Alberich. (2018). *Alberich*. Obtenido de Alberich: <https://alberich.net/es/reciclaje-de-motores-electricos/>
- Algarín, C., Giraldo, J., & Castro, A. (2018). *Criterios en la Planificación Energética de Zonas Rurales Colombianas*. Información Tecnológica.
- Algarín, C., Llanos, A., & Castro, A. (2017). An analytic hierarchy process-based approach for evaluating renewable energy sources. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7(4).
- Algarín, Giraldo, & Castro. (2017). *An Analytic hierarchy process based approach for evaluating renewable energy sources*. *International Journal of Energy Economics and Policy*.
- Algarín, Girardo, & Castro. (2018). *Criterios en la Planificación Energética de Zonas Rurales Colombianas*. Información Tecnológica.
- ARCONEL. (2018). *Generación fotovoltaica para autoabastecimiento de consumidores finales de energía eléctrica*. Regulación ARCONEL 003/18.
- Bárceñas, E. (2002). *Análisis y desarrollo de un inversor multinivel*. Cuernavaca: CENIDET.
- BBC. (2 de marzo de 2021). *BBC*. Obtenido de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-56073419>
- Benavides, F. (2018). *“DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS SEGREGADAS EN GRANDES MÁQUINAS POR EL MÉTODO CALORIMÉTRICO*. TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO.
- Blanco, I., Corral, B., & Costa, A. (2004). *Inversores de multinivel para aplicaciones de gran potencia* (Vol. 24). Estado del arte. Energética.
- Blanco, R., Díaz, J., Gonzales, F., Peraza, C., & Villanueva, C. (2008). *Control de inversores en sistema de generación distribuida*. Valencia, Venezuela: Universidad de Carabobo.
- BROADCOM. (2016). *ACPL-790B, ACPL-790A, ACPL-7900*. Avago Technologies.

- Calderon, J. (2001). *Generadores asincrónicos. Estudio teórico y operación*. Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- Chapman, S. (2015). *Máquinas Eléctricas*. Editorial MC-Graw Hill.
- Dugan , R. C., McGranaghan, M., Santoso, S., & Beaty, W. (2012). *Electrical Power Systems Quality* . New York, EEUU: McGraw-Hill Education, 3th Edition.
- Ematec. (26 de Julio de 2022). *Ematec*. Obtenido de <https://ematec.cl/en-que-consiste-el-rebobinado-de-motores-electricos/#:~:text=Cuando%20se%20habla%20de%20un,campos%20magn%C3%A9ticos%20para%20las%20RPM>.
- Endesa. (10 de Octubre de 2019). *Endesa*. Obtenido de Endesa: <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/biografias/tesla-edison-guerra>
- Expoknews. (Abril de 2019). *Expoknews*. Obtenido de <https://www.expoknews.com/que-impacto-ambiental-tiene-la-energia-eolica/>
- Flores, C. (2016). *Convertidores DC-AC*. Salina Cruz Oax.: ITSAL.
- Gaikwad, V., Mutha, S., Mundhe, R., Sapar, O., & Chinchole, T. (2016). Survey of PWM techniques for solar inverter. International Conference on Global Trends in Signal Processing.
- Garcia, S. (Marzo de 2019). *Renovetec*. Obtenido de <http://energia.renovetec.com/plantas-de-cogeneracion/127-excitatriz-estatica#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20una%20excitatriz%20est%C3%A1tica,convertir%20%C3%A9ste%20en%20un%20electroim%C3%A1n>.
- Harper, E. (2004). *El ABC de la calidad de la energía eléctrica*. Editorial Limusa S.A.
- Iberdrola. (Noviembre de 2018). *Iberdrola*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/almacenamiento-de-energia-eficiente>
- Ichina, A. (2017). *Aplicaciones de los generadores sincronos*. Riobamba: Escuela Superior Politecnica de Chimborazo.
- Inga, E., & Juera, J. J. (2013). *Diseño y construcción de módulos para convertidores DC-AC aplicando técnicas de control vectorial para el laboratorio de Eletrónica de Potencia de la UPS Cuenca*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.

- Mañana, M. (2015). *Regulación, Control y Protección de Máquinas Eléctricas*. Santander: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones .
- Mario, G. (2014). *Generadores Síncronos*. Lima: Universidad Tecnológica de Perú.
- Martínez, S., & Gualda, J. (2006). *Electrónica de Potencia*. Madrid: Paraninfo.
- MINEM. (2016). Calidad de la energía eléctrica. 1-8.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2009). *Electrónica de Potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño 3ra Edición*. Monterrey: McGraw Hill Educación.
- Nava, F., & Mariano, J. (2004). *Estudio e implementación de un convertido multicelda apilable controlado por DSP*. Puebla: Universidad de la Americas Puebla.
- O'Reilly, K. (2020). *Medida y Análisis de la Distorsión Armónica en Cargas No Lineales Aisladas y Combinadas en los Rangos 0-2 kHz y 2-9kHz*. Santander, España: Universidad de Cantabria.
- Octavio, L. (Febrero de 2020). *Facultad de Ingeniería de Veracruz*. Obtenido de https://www.uv.mx/veracruz/miaplicada/files/2021/07/Tesis_Octavio-Lopez-Lagunes.pdf
- Ormeño, E., Barzola, J., & Vivert, M. (2020). *Controlador DQ para un inversor monofásico conectado a la red con compensación de armónicos*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte .
- Pérez, E., Osorio, E., & Parra, W. (2015). *Diseño, calculo, simulacion e implementación de un inversor de 100W para carga resistiva, con control modo voltaje*. Lima: JOUR.
- Pernía, M. (2011). *Conceptos básicos de máquinas sincrónicas* . Tachira: Universidad Nacional Experimental del Tachira.
- Pietzsch, G., & Bordonau, J. (2012). *Convertidores CC/CA para la conexión directa a red de sistemas fotovoltaicos: comparación entre tipologías de 2 y 3 niveles*. (U. P. BARCELONATECH, Ed.) Barcelona.
- Prodel. (2022). Obtenido de <https://www.prodel.es/subareas/maquinas-electricas/>
- Ramirez Castaño, S., & Cano Plata, E. (2006). *Calidad del Servicio de Energía Eléctrica*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

- Rashid, M. H. (2002). *Electronica de Potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. New York: PRENTICE HALL HISPANOAMERICANA S.A.
- Roa, C. (2019). *Redes Eléctricas*. Maracay: Departamento de Ingeniería Eléctrica UNEFA Maracay .
- Robert, E., & Dragan, M. (2004). *Fundamentals of Power Electronics 2da Edition*. New York: Kluwer Academic Publishers.
- Rodríguez, M. (2018). *Máquinas Eléctricas ii*. Cantabria: Universidad de Cantabria.
- Rosas, M. (2014). *Convertidor CD/CA sin aislamiento con conexión a la red eléctrica para aplicaciones en paneles solares*. Sab Luis Potosí: Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- Sguario, E. (1746). *Google Books*. Obtenido de <http://books.google.es/books?id=X-InAAAAMAAJ>
- Silva, M. (2005). Calidad de la energía eléctrica: diseño y construcción de un prototipo como alternativa para la monitorización de interrupciones y caídas de tensión. *Universidad Industrial de Santander* , 2.
- Teresa, B., & Serrano, A. (2018). *Universidad Politécnica de Madrid*. Obtenido de <https://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfísica/magnet/generador.html>
- Texas Instruments. (2019). *LAUNCH-XLF28379D Development Kit*. Texas.
- Texas Instruments. (2019). *UCC53x0 Single-Channel Isolated Gate Driver*. Texas.
- Unigal. (2018). *Unigal*. Obtenido de <https://unigal.mx/curva-de-capacidad-de-un-generador-sincrono/#:~:text=los%20Curva%20de%20capacidad,operaci%C3%B3n%20o%20Gr%C3%A1ficos%20de%20capacidad>.
- UTN. (17 de Octubre de 2019). *Universidad Técnica del Norte*. Obtenido de <https://www.utn.edu.ec/>
- VISHAY. (2012). *Datasheet D Series Power MOSFET: SiHP25N40D*.

Anexos



Anexo 1, Partes del G.S bifásico.



Anexo 2, Devanado anteriores cortados.



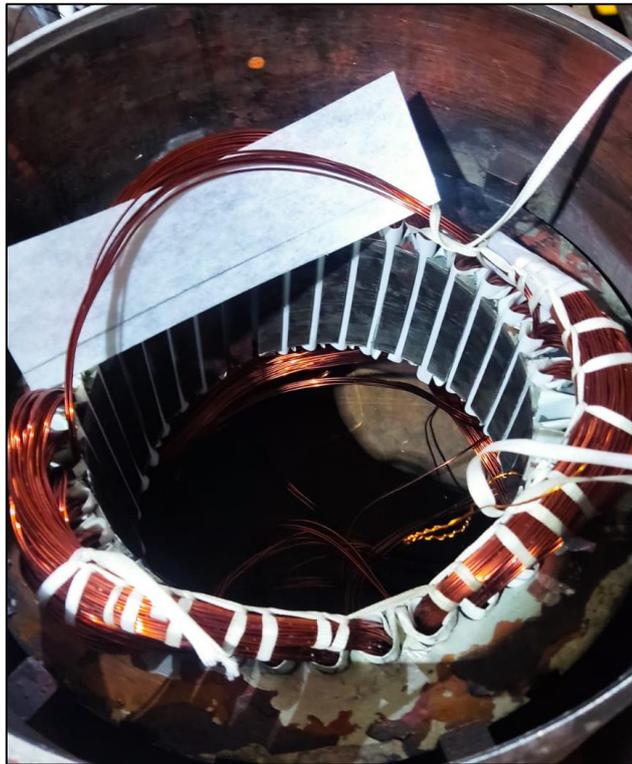
Anexo 3, Cortando papel aislante.



Anexo 4, Colocando papel aislante en las ranuras.



Anexo 5, Colocación de los nuevos devanados.



Anexo 6, Amarrando y asilando los devanados.



Anexo 7, Devanados aislados y amarrados.



Anexo 8, Empalmando y soldando las salidas de los devanados.



Anexo 9, Colocando nuevo devanado en el estator secundario.



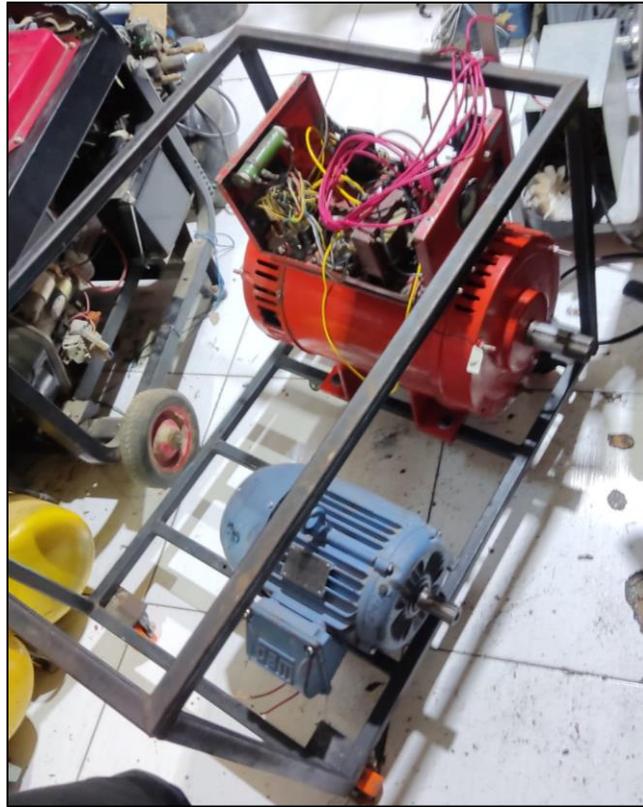
Anexo 10, Armando G.S trifásico.



Anexo 11, Cortando estructura metálica.



Anexo 12, Motor impulsor.



Anexo 13, Alineando el motor impulsor y el G.S trifásico.



Anexo 14, Cortando riel para el tablero.



Anexo 15, Pegando sticker en el tablero.