



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**Diseño, construcción y puesta en operación de un banco
de pruebas para el generador de inducción**

TESIS

Para obtener el grado de
Ingeniero en Sistemas de Energía

PRESENTA

Leiber Lorriel Amadeo Yah

DIRECTOR DE TESIS

M.C Emmanuel Torres Montalvo

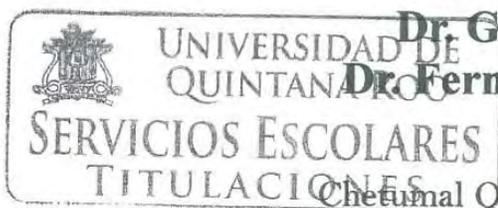
ASESORES

Dr. Freddy Ignacio Chan Puc

M.E.S. Roberto Acosta Olea

Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool

Dr. Fernando Enrique Flores Murrieta



Chetumal Quintana Roo, México, Diciembre de 2015.



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

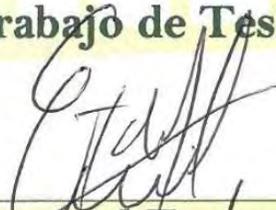
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Trabajo de Tesis elaborado bajo supervisión del Comité de asesoría y aprobada como requisito parcial para obtener el grado de:

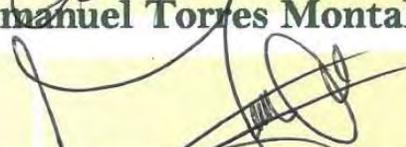
INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

Comité de Trabajo de Tesis

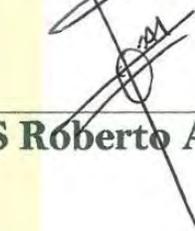
Director:


M.C Emmanuel Torres Montalvo

Asesor:


Dr. Freddy Ignacio Chan Puc

Asesor:


M.E.S Roberto Acosta Olea



Chetumal, Quintana Roo, México, Diciembre de 2015

Agradecimientos

Antes que a nadie le agradezco a Dios, quien me ha dado la maravillosa oportunidad de estar vivo, y permitirme llegar hasta esta etapa de mi vida.

A mis padres que han estado conmigo tanto en los momentos fáciles así como en los difíciles. Por el amor y la confianza que me han dado las fuerzas para seguir adelante y lograr hacer de mí una persona de buenos principios.

A mis hermanos quienes con palabras de aliento me motivaron para seguir adelante y enfrentar cualquier adversidad que se presentara.

A mis amigos con quien compartí estos cinco años en los salones de clase. Por su apoyo incondicional para seguir adelante y avanzar juntos.

A mi director de tesis el M.C Emmanuel Torres Montalvo por permitir trabajar con él para la realización de este trabajo, así como la asesoría técnica, así como el incondicional apoyo y la amistad que siempre me ha brindado.

A mis asesores, el M.E.S Roberto Acosta Olea y el Dr. Freddy Ignacio Chan Puc por su asesoría técnica durante la elaboración de este trabajo así como la amistad que me han brindado.

A todos los profesores de la División de Ciencias e Ingenierías por su motivación y enseñanza que me brindaron.

CONTENIDO

<i>Agradecimientos</i>	iii
<i>Índice de Tablas</i>	ix
<i>INTRODUCCIÓN</i>	x
<i>OBJETIVOS</i>	xii
Objetivo general	xii
Objetivos Específicos	xii
<i>Abreviaciones</i>	xiii
<i>CAPÍTULO I: Generación Distribuida</i>	1
Introducción	1
1.1 Antecedentes de SEIG	2
1.2 Razones para la Generación Distribuida (GD)	3
1.3 Impactos de la Generación Distribuida	4
• Problemas debido al calentamiento	4
• Problemas con las tensiones manejadas	4
• Las contribuciones de los niveles de fallas	5
• Armónicos y las interacciones con las cargas	5
• Interacciones con las unidades generadoras	6
• Protección	6
1.4 Impacto económico de la generación distribuida	7
1.5 Fuentes de Energías Renovables	8
1.5.1 Energía Hidráulica	8
1.5.2 Energía Eólica	8
1.5.3 Energía de la Biomasa	9
1.5.4 Energía solar fotovoltaica	10
1.5.5 Energía Geotérmica	10
<i>CAPÍTULO II: El Generador de Inducción Auto-excitado (SEIG)</i>	12
Introducción	12

2.1 Principio de funcionamiento del Generador de Inducción Auto-Excitado	13
2.2 Aplicaciones de los SEIG	14
2.3 Clasificación del Generador de Inducción	15
2.3.1 Velocidad constante – Frecuencia constante	15
2.3.2 Velocidad variable – Frecuencia constante	15
(i) Enlaces CA-CD-CA	16
(ii) Generador de Inducción doblemente alimentado	16
2.3.3 Velocidad variable – Frecuencia variable	17
2.4 Esquema de conexión y elementos del SEIG	18
2.4.1- Parámetros de la máquina	19
2.4.2.- Inductancia de magnetización.	19
2.4.3.- Velocidad del primo motor	19
2.4.5 Banco de capacitores	19
2.5 Pruebas para la determinación de los parámetros de la máquina de inducción.	19
2.5.1 Prueba en Vacío.	20
2.5.2 Prueba de rotor bloqueado	21
2.5.3 Prueba de C.D.	22
2.5.4 Prueba de Saturación Magnética	23
2.6 Instrumentación Requerida	25
<i>CAPÍTULO III: Construcción del Banco de pruebas del SEIG</i>	27
Introducción	27
3.1 Instalación y configuración del Variador de velocidad	28
3.2 Sistema de acoplamiento mecánico (Primo motor- Generador)	28
3.3 Diseño y construcción del banco de capacitores	30
3.4 Ensamble de las cargas eléctricas	41
3.4.1 Resistivas	41
3.4.2 Inductivas	42
3.4.3 Capacitiva	42

3.5 Procedimiento para la operación del SEIG.....	43
<i>CAPÍTULO IV Puesta en operación del banco de pruebas.....</i>	<i>48</i>
Introducción.....	48
4.1 Metodología para hacer las pruebas.....	49
4.2 En Vacío.....	50
4.3 Resistiva.....	51
4.4 Inductiva.....	55
4.5 Capacitiva.....	59
4.6 Análisis del comportamiento con las 3 cargas.....	63
<i>CAPÍTULO V: Conclusiones.....</i>	<i>64</i>
Bibliografía.....	65

Índice de Figuras

Página

Fig. 2.1	Fotografía Sistema de primo motor-generator.....	12.
Fig. 2.2	Curva de magnetización.....	13.
Fig. 2.3	Un sistema DFIG con un aerogenerador.....	16.
Fig. 2.4	Conexión realizada durante la prueba en vacío.....	19.
Fig. 2.5	Conexión realizada durante la prueba de rotor bloqueado.....	20.
Fig. 2.6	Conexión realizada durante la prueba en C.D.....	21.
Fig. 2.7	Esquema de conexión del SEIG.....	22.
Fig. 2.8	Fluke 434 (Power Quality Analyzer.....	23.
Fig. 2.9	Tacómetro digital.....	24.
Fig. 3.1	Variador de velocidad.....	26.
Fig. 3.2	Acoplamiento que tiene ambas maquinas.....	27.
Fig. 3.3	Conector de goma.....	27.
Fig. 3.4	Conexión del motor-generator.....	28.
Fig. 3.5	Capacitores utilizados.....	29.
Fig. 3.6	Capacitores cortocircuitados con resistencias.....	29.
Fig. 3.7	Base para el banco de lámina de acero inoxidable.....	30.
Fig. 3.8	Base con los soportes de aluminio.....	30.
Fig. 3.9	Capacitores fijos en la placa.....	31.
Fig. 3.10	Identificación de los capacitores fijos en la placa.....	31.
Fig. 3.11	Conexión de los capacitores e identificación de cada uno.....	32.
Fig. 3.12	Conexión de los capacitores e identificación de cada uno.....	32.
Fig. 3.13	Conductor desnudo uniendo todos los capacitores.....	33.
Fig. 3.14	Capacitores aterrizados.....	33.
Fig. 3.15	Acrílico cortado a las dimensiones necesarias.....	34.
Fig. 3.16	Agujeros para los interruptores.....	34.
Fig. 3.17	Interruptores colocados en sus respectivos agujeros.....	35.
Fig. 3.18	Tapa lateral y superior.....	35.
Fig. 3.19	Conexión interna de la fase A.....	36.
Fig. 3.20	Distribución de los capacitores.....	36.
Fig. 3.21	Conexión de todos los capacitores con cada interruptor.....	37.
Fig. 3.22	Fijación de la tapa frontal.....	38.
Fig. 3.23	Fijación de la tapa frontal.....	38.
Fig. 3.24	Carga resistiva, focos incandescentes.....	39.
Fig. 3.25	Carga inductiva.....	40.
Fig. 3.26	Carga capacitiva.....	40.
Fig. 3.27	Fijación de las maquinas.....	41.
Fig. 3.28	Fijación del variador de velocidad.....	42.
Fig. 3.29	Conexión del banco de capacitores y el equipo de medición.....	42.
Fig. 3.30	Conexión de la carga.....	43.
Fig. 3.31	Generador en funcionamiento.....	44.
Fig. 3.31	Capacitores conectados para excitar al generador.....	44.

Fig. 3.32	Carga encendida.....	45.
Fig. 4.1	Configuración del Fluke.....	47.
Fig. 4.2	Tensión generada en vacío.....	49.
Fig. 4.3	Tensión con carga resistiva.....	50.
Fig. 4.4	Corrientes con carga resistiva.....	51.
Fig. 4.5	Potencia con carga resistiva.....	52.
Fig. 4.6	Diagrama fasorial con carga resistiva.....	52.
Fig. 4.7	Armónicos de tensión con carga resistiva.....	53.
Fig. 4.8	Tensión con carga inductiva.....	54.
Fig. 4.9	Corrientes con carga inductiva.....	55.
Fig. 4.10	Potencias con carga inductiva.....	55.
Fig. 4.11	Diagrama fasorial de tensión con carga inductiva.....	56.
Fig. 4.12	Diagrama fasorial de corriente con carga inductiva.....	56.
Fig. 4.13	Tensión generada con carga capacitiva.....	58.
Fig. 4.14	Corrientes con carga capacitiva.....	58.
Fig. 4.15	Potencias con carga capacitiva.....	59.
Fig. 4.16	Diagrama fasorial de tensión con carga capacitiva.....	59.
Fig. 4.17	Diagrama fasorial de corriente con carga capacitiva.....	60.
Fig. 4.18	Distorsión armónica de tensión con carga capacitiva.....	60.
Fig. 4.19	Distorsión armónica de corriente con carga capacitiva.....	61.

Índice de Tablas

Tabla 2.1	Parámetros calculados.....	22.
Tabla 4.1	Datos de la prueba en vacío.....	48.
Tabla 4.2	Resultados con carga resistiva.....	50.
Tabla 4.3	Resultados con carga inductiva.....	54.
Tabla 4.4	Resultados con carga capacitiva.....	57.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la energía eléctrica a nivel global se encuentra en un estado muy crítico. En México por lo menos 2 millones de personas carecen de energía eléctrica, es decir alrededor de 2 por ciento de toda la población [1]. Debido a esta carencia, estas comunidades no pueden incorporarse en las distintas actividades productivas, educación y acceso a tecnologías. Las personas que no cuentan con electricidad habitan en poblaciones de menos de 10 mil habitantes que se encuentran diseminadas por todo el territorio nacional, siendo esta la razón no tienen servicio de energía eléctrica [2]. A raíz de este problema se buscan formas alternas de producir energía eléctrica y hacerla llegar a estas poblaciones. Las formas de energía alterna más comunes en México son la Fotovoltaica, Eólica y la Hidráulica. Usar estas formas de energía brinda muchos beneficios, tanto al país como al planeta. La electricidad es uno de los requerimientos básicos en el incremento de las producciones agrícolas, esto es porque se minimizan las pérdidas de los cultivos y se impulsan las pequeñas industrias y artesanales que crean nuevas oportunidades de empleo e ingresos. También tiene varios beneficios sociales, como la iluminación para las escuelas, áreas de recreación, así como aplicaciones de refrigeración para la conservación de alimentos y medicamentos. La implementación de sistemas eléctricos en áreas remotas son muy vulnerables a problemas técnicos, por eso es que se utilizan equipos y sistemas que sean más seguros, menos costosos, requieran poco mantenimiento y simples de manejar. En el desarrollo de las energías renovables el generador de inducción ha jugado un papel preponderante, es por esto de vital importancia contar con medios para analizar y predecir el comportamiento del generador en este tipo de desarrollo de fuentes renovables [3].

El generador de inducción es ampliamente usado en la generación de energía eléctrica con fuentes renovables como la eólica y la hidráulica. Particularmente el esquema denominado generador de inducción auto-excitado (SEIG por sus siglas en inglés) es empleado en las centrales micro y mini hidráulicas. Aunque el comportamiento del SEIG está publicado para cargas resistivas aún no está documentada de manera amplia su respuesta con cargas inductivas y/o capacitivas. La energía hidráulica es una de las formas de energía más aprovechadas a gran escala. Como la mayoría de estas plantas se encuentran en lugares muy remotos se necesita equipo robusto y que requiera poco mantenimiento. El generador de inducción auto-excitado es una buena opción por sus características. Para que el SEIG opere necesita una cantidad razonable de potencia reactiva que debe ser alimentada externamente para establecer el campo magnético necesario y convertir la energía mecánica en su eje en energía eléctrica [4]. Esta potencia reactiva se puede adquirir de un banco de capacitores conectado en las terminales del SEIG. Cuando el eje es impulsado por medio de un primo motor, este movimiento interactúa con el campo magnético residual e induce una tensión a través del capacitor, resultando en una corriente en el circuito paralelo que, a su vez, refuerza el campo magnético dando como resultado una tensión en las terminales del generador. El banco de pruebas que se pretende implementar permitirá conocer y analizar el comportamiento del SEIG y podrá ser usado para fines de docencia y de investigación que permitan el desarrollo de sistemas de generación de energía eléctrica para sistemas aislados de la red eléctrica.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Diseñar, construir y poner en operación un banco de pruebas para el generador de inducción en la configuración de auto-excitado.

Objetivos Específicos

- Instalar y programar el variador de velocidad.
- Realizar las conexiones, así como las adaptaciones eléctricas y mecánicas para acoplar el primo motor con el generador.
- Diseñar y construir el banco trifásico de capacitores para suministrar la energía reactiva al SEIG.
- Construir los diferentes módulos de cargas eléctricas, resistivas inductivas y capacitivas.
- Realizar Pruebas bajo diversas condiciones de carga eléctrica: vacío, carga resistiva, carga inductiva y carga capacitiva.
- Analizar el comportamiento dinámico del generador.

Abreviaciones

SEIG	Self Excited Induction Generator
ER	Energías Renovables
GD	Generación Distribuida
kW	Kilo-Watt
kVAR	Kilo volts Amper Reactivos (Potencia Reactiva)
CD	Corriente Directa
CA	Corriente Alterna
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
CSI	Current Source Inverter
NEMA	National Electrical Manufactures Association.
IEC	International Electrotechnical Commission
L _r	Inductancia del rotor
L _s	Inductancia del estator
R _s	Resistencia del estator
R _r	Resistencia del rotor
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
CHP	Combined Heat and Power.
V _{prom}	Tensión promedio
I _{prom}	Corriente promedio
W	Velocidad de rotación

CAPITULO I: Generación Distribuída

Introducción

La generación distribuida (GD) está relacionada con el uso de pequeñas plantas de generación instaladas en puntos estratégicos, cerca de los sistemas eléctricos de potencia, o de una concentración de cargas [2]. Se puede usar de una manera aislada, aportando energía a una población o también se puede integrar al sistema de distribución de energía eléctrica para aportar energía al sistema. La tecnología de la generación distribuida puede operar con energías renovables (ER), combustibles fósiles o calor residual. La GD puede suministrar energía a una comunidad o también se puede vender la energía a una compañía suministradora conectada al sistema de distribución o de transmisión. Tanto la GD como las ER se consideran muy importantes para mejorar la seguridad de las formas de producción de energía eléctrica actualmente, ya que así se disminuye la utilización de combustibles fósiles, y reduciendo la cantidad de gases de efecto invernadero. La viabilidad de ambas depende mucho de las medidas de regulación y estimulación, lo cual es una decisión política [2].

1.1 Antecedentes de SEIG

La máquina de inducción ha sido utilizada desde principios del siglo 20. Sin embargo, en los años 60's la abundante producción de combustibles fósiles los llevó a su casi completa inutilización. Con el incremento drástico en el precio del petróleo en los años 70's, la máquina de inducción regresó a ser utilizado nuevamente. Debido a los costos altos de energía, la recuperación de energía llegó a ser parte importante de la economía de la mayoría de los procesos industriales. El generador de inducción es ideal para estas aplicaciones debido a que requiere mínimo control o mantenimiento. Para finales de los 80's la amplia distribución de la población alrededor del planeta, ha mejorado la transportación y la comunicación, permitiendo a la gente moverse lejos de las grandes concentraciones urbanas, y haciendo crecer la importancia de la demanda de energía eléctrica de muchas comunidades aisladas [5]. En los años 90's, ideas como la generación distribuida comenzaron a ser discutidas por las compañías suministradoras y en centros de investigación. Una conciencia general acerca de las fuentes de energía limitadas y finitas en el planeta y las disputas internacionales acerca del ambiente, seguridad global, y la calidad de vida, han creado una oportunidad para nuevas plantas, más eficientes, con menos contaminación al ambiente, con tecnologías de control avanzadas, robustas y modulares. Actualmente, el generador de inducción parece ser una solución, debido a sus requerimientos mínimos de mantenimiento y controles sencillos. Por su simplicidad, robustez y menor tamaño por kW generado, el generador de inducción es el candidato apropiado para plantas hidroeléctricas pequeñas y para generación eólica. En la actualidad, con el uso de la electrónica, computadoras y microcontroladores electrónicos, se ha hecho más accesible el manejo de los generadores de inducción los cuales son más eficientes con valores mayores a 500 kVA [5].

El generador de inducción se encuentra siempre asociado con fuentes alternativas de energía, particularmente para pequeñas plantas de generación, ya que es más

económico. Otra forma de operación es trabajando aislado, teniendo una potencia máxima no más allá de 15 kW. Por otro lado, si un generador de inducción es conectado a la red eléctrica u otras fuentes, fácilmente puede alcanzar 100 kW [6].

1.2 Razones para la Generación Distribuida (GD)

Algunas de las ventajas de la GD se mencionan a continuación:

- Es más económico que poner líneas de transmisión en lugares muy remotas
- Puede servir como respaldo, en caso de interrupciones de energía eléctrica, para plantas que requieren un suministro de energía ininterrumpible.
- Para la estabilidad de la red en el uso de equipo de respuesta rápida para mantener seguro el sistema de transmisión.
- Los costos debido a la transmisión son reducidos ya que los generadores están más cerca a la carga, así como el tiempo para la construcción de las plantas pequeñas y el costo de inversión.
- Tecnologías como las celdas de combustible, micro turbinas y las fotovoltaicas pueden servir en varias capacidades, ya sean como respaldo o energía de emergencia, eliminando picos o cargas con baja potencia.
- Las plantas que operan con energías renovables reducen las emisiones de CO₂? a la atmosfera, comparado con las plantas grandes que utilizan combustibles fósiles.
- Pueden incrementar la alta confiabilidad y calidad de la energía para establecimientos, particularmente cuando se combina el almacenamiento de energía y la calidad de las tecnologías.
- Estas plantas de generación pueden ser reubicadas.

1.3 Impactos de la Generación Distribuida.

Las tecnologías de la generación distribuida (GD) incluyen máquinas eléctricas, pequeñas turbinas eólicas, celdas de combustible y sistemas fotovoltaicos. A pesar de su tamaño, estas tecnologías actualmente tienen un impacto más fuerte en el mercado de la energía eléctrica. En algunos mercados, la GD actualmente está reemplazando a la red de electricidad más costosa. Sin embargo, tiene unos problemas técnicos que deben ser atendidos, que son los siguientes [2].

- **Problemas debido al calentamiento.**

La secuencia de carga es alterada cuando la GD es conectada al sistema de distribución. Las líneas de distribución resultan en ser sobrecargadas debido a la demanda de las cargas conectadas. Es común que hay niveles altos de GD esto nos causa un incremento en la corriente en el sistema de distribución, y a su vez poniendo en riesgo los componentes del sistema ya que empiezan a operar cerca de sus límites térmicos. Si los límites térmicos de los elementos en el circuito son excedidos a causa de la GD, entonces los elementos tienen que ser reemplazados por circuitos con un soporte térmico mayor. Esto lleva a tener que reemplazar con conductores con un área transversal mayor [2].

- **Problemas con las tensiones manejadas.**

En un sistema de distribución es típico que los niveles de tensión están a un máximo cerca del bus del transformador de distribución, y las caídas de tensión a través de los alimentadores están dados por las cargas conectadas. Las caídas de tensiones son generalmente mayores y muy comunes en los sistemas de distribución rurales, que son usuales en sistemas radiales donde los alimentadores corren grandes distancias con conductores con baja capacidad de corriente, especialmente en los extremos remotos de los conductores [2].

Los sistemas de GD por otro lado ayudan a minimizar estas caídas de tensión ya que al conectarse al sistema de distribución causa un incremento de tensión en ciertos puntos del sistema. Pero a su vez también éste incremento de tensión causa que los conductores operen con una tensión mayor a la que debe operar. El aumento de tensión se puede reducir de las siguientes formas:

1. Reduciendo el tamaño de la planta de GD: el nivel de incremento de tensión dependerá del nivel de generación con respecto a la demanda mínima.
2. Reforzando el sistema de distribución (utilizando conductores más grandes con impedancias menores).

- **Las contribuciones de los niveles de fallas**

Una falla en un sistema de distribución puede ocurrir de muchas formas, debido a una línea caída o un conductor enterrado que este dañado. Las corrientes de falla de un sistema de distribución pueden venir de tres fuentes: del sistema de transmisión, de los generadores distribuidos o de las cargas (motores de inducción).

La conexión de GD incrementa el nivel de falla en los puntos de conexión. Este incremento en el nivel de falla se debe a la aportación del generador, lo que puede ocasionar que ésta falla exceda los niveles de protección para los cuales están diseñados los sistemas de distribución. Estos problemas pueden solucionarse o reducirse, ya sea actualizando los equipos empleados o reconfigurando los sistemas de distribución [2].

- **Armónicos y las interacciones con las cargas**

En las redes de electricidad ideales, la tensión tendría una señal sinusoidal perfecta y 60 ciclos por segundo por ejemplo. Sin embargo, cualquier efecto capacitivo o inductivo, debido a la conmutación de dispositivos tales como conductores grandes, variadores de velocidad, fuentes de CC rectificadas,

introducen o amplifican componentes “armónicos” en la señal de tensión, así distorsionando la forma de onda de tensión. Se espera que los sistemas pequeños tanto de sistemas de micro eólicos y la generación con energía solar sean conectadas mediante inversores. La conexión de inversores incorpora el uso de una alta proporción de componentes de conmutación que tienen el potencial de aumentar las contribuciones armónicas [2]

- **Interacciones con las unidades generadoras**

Debido al aumento en los niveles de generación renovable intermitente y las fluctuaciones de las unidades de ciclo combinados (CHP combined heat and power) hace que eventualmente sea más difícil manejar el balance entre la fuente y la demanda del sistema de potencia. Si las plantas de GD pueden ofrecer las mismas funciones de control como los generadores, la cantidad de energía reservada tendría que ser aumentada, ya que al momento de que la aportación por la GD sea significativa, esta sea almacenada adecuadamente para posteriormente sea utilizada [2] [6].

- **Protección**

Las redes de distribución son diseñadas para conducir corriente de tensiones altas hacia tensiones bajas y los dispositivos de protección son diseñados para reflejar este concepto. Bajo condiciones donde la corriente fluye en dirección opuesta, mala operación del sistema de protección o un incremento en los riesgos de las fallas ocurren como consecuencia, aumentando el riesgo de que falle todo el sistema de generación.

Debido a la corriente fluyendo en sentido opuesto, el alcance del relevador es acortado, dejando fallas de alta impedancia sin ser detectados. Cuando un interruptor opera, una porción de la red eléctrica permanece energizada, mientras

aislado del resto del sistema, resultando en daños tanto al equipo utilizado como al usuario [2].

1.4 Impacto económico de la generación distribuida.

La generación distribuida tiene ventajas económicas comparadas con el sistema de generación convencional [2]. La posibilidad de generar tanto calor como potencia en una planta de cogeneración puede crear oportunidades económicas adicionales. La GD puede estar mejor posicionado para usar combustibles más baratos como los gases de relleno sanitario. Los precios relativos de la venta de energía eléctrica y los costos de combustibles son críticos para la competitividad para cualquier forma de GD [9].

En México, existe la Ley para el Aprovechamiento de Energías renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, así como en el Programa Especial de Cambio Climático 2008-2012, establecen que ahora se puede instalar en un domicilio o negocio una fuente propia de energía renovable o sistema de cogeneración en pequeña o en mediana escala y realizar un contrato de interconexión con la empresa suministradora [12].

Para realizar un contrato de interconexión en pequeña escala con la CFE, los requisitos son:

1. Que el usuario tenga un contrato de suministro normal en baja tensión.
2. Que las instalaciones cumplan con las Normas Oficiales Mexicanas y con las especificaciones de la CFE.
3. Que la potencia de la fuente no sea mayor que 10 kW, si se instala en un domicilio o de 30 kW si se instala en un negocio.

Y para realizar la interconexión en mediana escala los requisitos son los siguientes

1. Que tengas un contrato de suministro normal en media tensión.

2. Que las instalaciones cumplan con las Normas Oficiales Mexicanas y con las especificaciones de CFE.
3. Que la potencia de la fuente no sea mayor de 500kW.

1.5 Fuentes de Energías Renovables

Hay fuentes de energías renovables que son inagotables, por ejemplo, la eólica, la solar, la geotérmica, biomasa y la hidráulica entre otras [2]. Los cuales son explicados en breve.

1.5.1 Energía Hidráulica.

Aunque el potencial para sistemas hidroeléctricos pequeños depende de la disponibilidad de un flujo de agua adecuada, donde los recursos existen pueden proporcionar energía eléctrica barata, limpia y segura. Plantas hidroeléctricas convierten la energía cinética de una cascada en energía eléctrica. La potencia disponible en un flujo de agua depende en la distancia vertical de la caída del agua así como también el volumen del agua que fluye. El agua acciona a una turbina, y el movimiento rotacional es transferido a través de su eje a un generador eléctrico. Una planta hidroeléctrica altera el entorno natural. Por lo tanto los efectos al medio ambiente deben ser evaluados durante la planeación del proyecto para evitar problemas como el ruido o el daño a los ecosistemas [2].

1.5.2 Energía Eólica

La energía eólica seguirá evolucionando ya que se están desarrollando nuevos diseños para las turbinas, reduciendo el costo y así sea más viable para distintos lugares. La velocidad del viento varía naturalmente dependiendo de la hora del día, las estaciones del año y la altura de la turbina partiendo del suelo. Un generador eólico convierte la energía del viento en energía eléctrica. Generadores

eólicos pueden ser divididos en dos categorías, los de eje horizontal y los de eje vertical. La tecnología de las turbinas ha modernizado significativamente durante los últimos años. Actualmente las pequeñas turbinas tienen una capacidad de producción entre los 5 y 40 kW, que puede suministrar energía eléctrica a hogares y negocios pequeños. Los de media capacidad son entre 100 y 500 kW, produciendo energía mayormente para ser comercializada [2] En México se encuentran 32 parques eólicos operando. Se encuentran instalados en cinco estados, estos son Jalisco con una capacidad de 50.4 MW, en Nuevo León con una capacidad de 22 MW, Tamaulipas con una capacidad de 54 MW, en Chiapas con una producción de 28.8 MW y en Oaxaca donde se tiene la mayor capacidad instalada que es de 1,757.47 MW [9] [11].

1.5.3 Energía de la Biomasa

La biomasa se refiere a la vegetación de la tierra y los productos que provienen de él. Algunos de los biocombustibles son la madera, residuos agrícolas y cultivos energéticos. Las industrias utilizan la biomasa para producir energía eléctrica. De acuerdo al banco mundial, 50 a 60% de la energía en los países de Asia, y de 70 a 90% de la energía en países de África proviene de la biomasa. En USA, Japón y Europa, residuos agrícolas y municipales son quemados para producir energía eléctrica [2]. En México la biomasa supone una oportunidad significativa de producción de electricidad competitiva y de bajo impacto ambiental. La capacidad actualmente instalada para la producción eléctrica por medio de la biomasa es de 677.8 MW, donde el 89.62% de la producción es por medio del aprovechamiento de la combustión directa de bagazo, el 6.61% proviene del biogás producido de los lodos residuales, agropecuarios, industriales y residuos sólidos urbanos, y el 3.76% proviene del licor negro producido en la industria papelera [9] [12] [15].

1.5.4 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar. Funcionan por medio del efecto fotovoltaico a través del cual la luz solar se convierte en electricidad sin usar ningún proceso intermedio. Los dispositivos donde se lleva a cabo la transformación de luz solar en electricidad se llaman generadores fotovoltaicos y a la unidad mínima en la que se realiza dicho efecto celdas solares, que al conectarse en serie y/o paralelo se forman los módulos fotovoltaicos.

Este tipo de energía se usa para alimentar innumerables aplicaciones y aparatos autónomos, para abastecer refugios o viviendas aisladas de la red eléctrica y para producir electricidad a gran escala a través de redes de distribución. Debido a la creciente demanda de energías renovables, la fabricación de celdas solares e instalaciones fotovoltaicas ha avanzado considerablemente en los últimos años. Entre los años 2001 y 2015 se ha producido un crecimiento exponencial de la producción de energía fotovoltaica, doblándose aproximadamente cada dos años. La potencia total fotovoltaica instalada en el mundo (conectada a red) ascendía a 16 GW en 2008, 40 GW en 2010, 100 GW en 2012 y 140 GW en 2013. A finales de 2014, se habían instalado en todo el mundo cerca de 180 GW de potencia fotovoltaica [2] [7]. En México hasta el 2010 se tenía una potencia instalada total de 28.62 MW. Y siendo utilizados para electrificación rural, residencial, bombeo de agua, comercial, industrial, sistemas aislado y conectados a la red [13].

1.5.5 Energía Geotérmica

La energía geotérmica, es energía de la tierra que es directamente utilizado como agua caliente o vapor, o también para producir energía eléctrica. Como los sitios geotérmicos de altas temperaturas adecuadas para la producción de electricidad no están muy extendidas, sitios de bajas temperaturas son encontrados muy seguido alrededor del mundo, los cuales proporcionan calefacción y refrigeración para los edificios. Los sistemas geotérmicos son ubicados en lugares donde la

corteza terrestre es relativamente delgada. Perforando en el suelo e insertando tubos. La energía geotérmica puede ayudar a reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Las bombas de calor geotérmicas (GHP) son una manera eficiente de calefacción y acondicionamiento para edificios. Las GHPs usan temperatura de la tierra para calefacción de edificios en invierno y enfriarlos en tiempo de verano. GHPs tienen ventajas ya que la temperatura del suelo no varía mucho durante el cambio en las estaciones del año [6]. Actualmente México es el cuarto país del mundo con mayor producción de energía geotérmica, con una capacidad instalada total de 958 MW que aportan 7% de toda la producción mundial de esta fuente. Entre las mayores ventajas de la geotermia está su bajo costo de tecnología para la generación, que en promedio es de 52 dólares por cada mega watt-hora (MWh), frente a los 280 dólares de la solar a gran escala, o los 100 dólares que cuesta la eólica marina y los 131 de la biomasa, de acuerdo con datos de la Prospectiva de Energías Renovables de la Secretaría de Energía [14].

CAPITULO II: El Generador de Inducción Auto-excitado (SEIG)

Introducción

El impacto de la contaminación del ambiente en el calentamiento global y los cambios climáticos resultantes pueden tener consecuencias desastrosas a largo plazo. El desarrollo tecnológico para la generación de energía eléctrica se está orientando hacia las fuentes seguras y renovables como la eólica, fotovoltaica, así también como a la explotación de los recursos micro y mini hidráulicos disponibles en las poblaciones aisladas o remotas que no tienen acceso al servicio de energía eléctrica. Una máquina de inducción trifásica puede operar como generador de inducción auto-excitado (SEIG) [4]. Si se conecta un banco de capacitores con un valor apropiado a las terminales de la máquina mientras el rotor es impulsado por un primo motor a una velocidad apropiada, se establecerá una tensión cuyo valor estará determinado por la saturación magnética de este mismo. En aplicaciones de energía renovable de baja y mediana potencia (hasta 100 kW), el generador de inducción auto-excitado ofrece muchas ventajas debido a su robustez, bajo costo, ausencia de escobillas (debido a que tiene rotor jaula de ardilla), construcción sencilla, mantenimiento mínimo, mayor estabilidad, auto protección en condiciones de falla y libre de problemas de operación por mucho años. Sin embargo, la demanda de potencia reactiva y una pobre regulación de tensión y frecuencia cuando la velocidad o la carga varían son las principales desventajas del SEIG.

2.1 Principio de funcionamiento del Generador de Inducción Auto-Excitado

Una máquina de inducción trifásica puede funcionar como un generador auto-excitado, cuando un primo motor hace girar su rotor a una velocidad apropiada, y la excitación necesaria para establecer el campo magnético giratorio en el entrehierro es suministrada conectando un banco trifásico de capacitores en las terminales de la máquina. La fuerza electromotriz y las corrientes inducidas en los devanados se incrementarán hasta alcanzar un punto de equilibrio causada por la saturación magnética en la máquina [4] [6]. El magnetismo residual en el rotor establece la tensión inicial, el cual se incrementa con la corriente del capacitor lo que provoca un incremento continuo de tensión. Como resultado de esta acción y de la saturación magnética, se establece una tensión de estado estacionario en las terminales del generador [6]. La **Fig. 2.1** muestra el sistema del SEIG que es la conexión del primo motor y el generador de inducción. En la **Fig. 2.2** está la curva de magnetización de la máquina de inducción. Algunas de las ventajas del generador de inducción auto-excitado (SEIG) son: la ausencia de escobillas y de una fuente de corriente directa separada, bajo costo, mejor estabilidad, construcción sencilla, mantenimiento mínimo, robustez y autoprotección (la tensión se colapsa cuando se produce un corto circuito en sus terminales) [2] [3] [6].

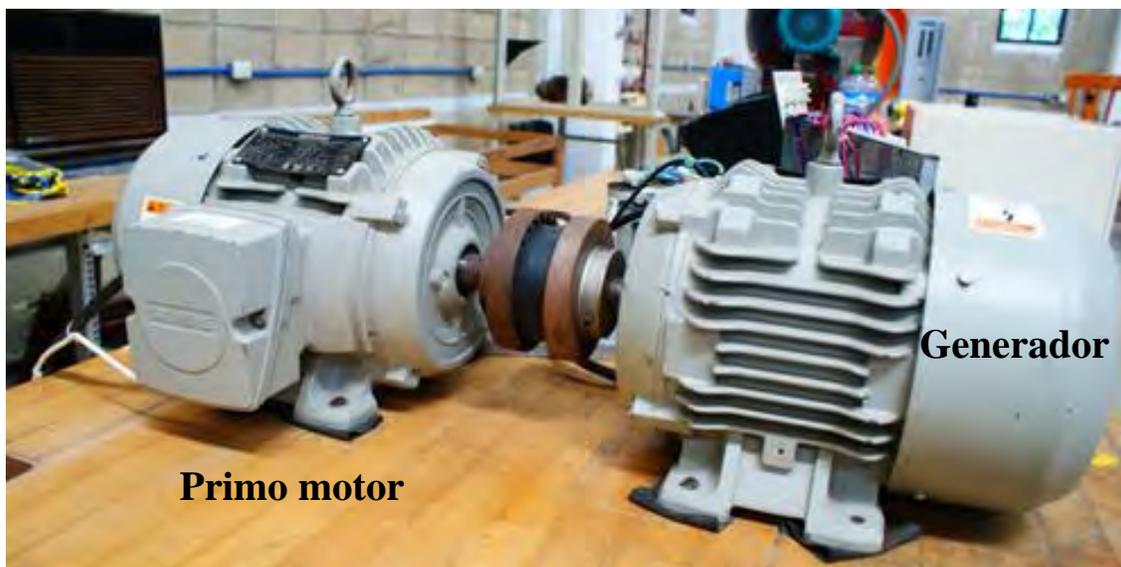


Fig. 2.1 Fotografía del sistema de primo motor – generador (Yah, 2015).

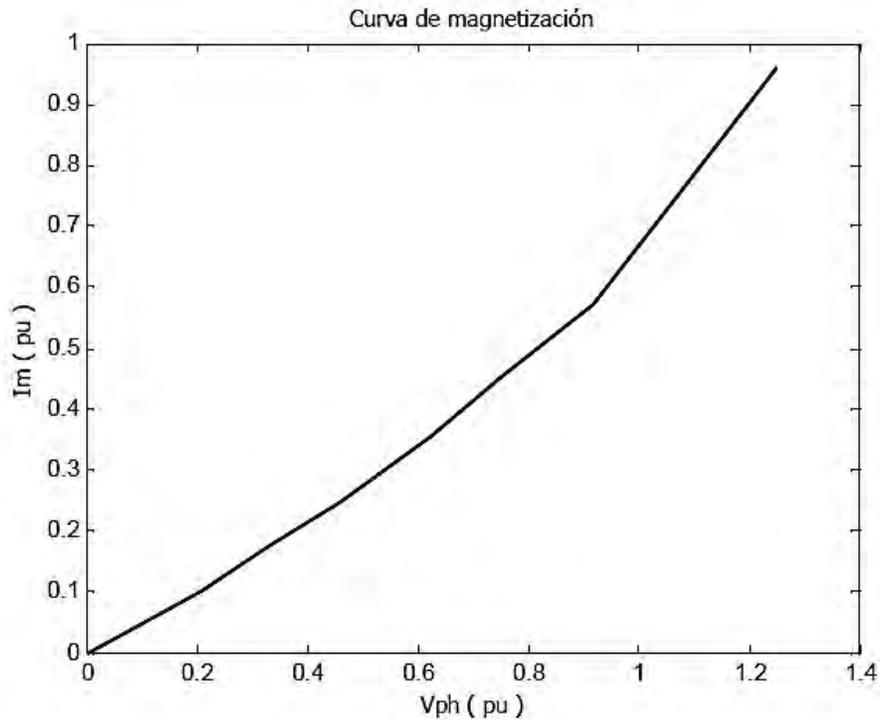


Fig. 2.2 Curva de magnetización (Torres, 2006).

2.2 Aplicaciones de los SEIG

Los generadores de inducción auto-excitados tienen muchas aplicaciones, y son comúnmente utilizados porque se pueden encontrar de bajas potencias. El generador de inducción está adquiriendo mayor popularidad para las fuentes de energías renovables. En aplicaciones de baja y media potencia (hasta 100 kW) [2] [6].

- En plantas de micro y mini hidráulica.
- En los parques de aerogeneradores.

2.3 Clasificación del Generador de Inducción

Dependiendo del primo motor empleado (velocidad constante o velocidad variable) y de su localización (cerca de la red de potencia o en lugares aislados) los esquemas de generación eólicos pueden ser clasificados de manera general como:

- 1) *Velocidad constante – Frecuencia constante*
- 2) *Velocidad variable – Frecuencia constante*
- 3) *Velocidad variable – Frecuencia variable*

2.3.1 Velocidad constante – Frecuencia constante

En este esquema la velocidad del primo motor se mantiene constante ya sea por un ajuste continuo en la orientación de la pala (generación eólica) y/o las características del generador [36]. Un generador de inducción puede operar en un bus infinito con un deslizamiento de 1% a 5% por encima de la velocidad sincrónica. Los generadores de inducción son más simples que los generadores sincrónicos. Son más fáciles de operar, controlar y mantener, no tienen problemas de sincronización y son económicos [3]

2.3.2 Velocidad variable – Frecuencia constante

La operación de sistemas eléctricos eólicos produce la mayor potencia de salida tanto para velocidades bajas como para velocidades altas. Esto resulta en la mayor producción anual de energía por capacidad instalada. Las turbinas horizontales así como las turbinas verticales presentan esta ganancia bajo la operación a velocidad variable. Los esquemas para obtener una frecuencia constante se mencionan a continuación. [3]

(i) Enlaces CA-CD-CA

Con la llegada de los tiristores de alta potencia, la salida de CA de un alternador trifásico es rectificadora por medio de un puente rectificador y después es convertida de nueva cuenta a CA usando inversores. Debido a que la frecuencia está determinada por la frecuencia de la red, son también conocidos como inversores sincrónicos [3].

(ii) Generador de Inducción doblemente alimentado

El generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) consiste de una máquina de inducción de rotor devanado acoplada a una turbina eólica o hidráulica. Las terminales del estator están conectadas a una red eléctrica con voltaje y frecuencia constante. La frecuencia variable de salida es alimentada a la red eléctrica por medio de un convertidor de enlace *ca-cd-ca* que consiste ya sea de un puente rectificador de onda completa y una combinación de inversor a base de tiristores, o de una fuente inversora de corriente (CSI current source inverter) y convertidor a base de tiristores. Una de las mayores ventajas del DFIG en sistemas eólicos es que es el único esquema en el cual la potencia generada es mayor que la potencia nominal de la máquina. Sin embargo, debido a las desventajas operacionales el esquema DFIG no puede ser ampliamente usado. Los requerimientos de mantenimiento son grandes, el factor de potencia es bajo, y la confiabilidad es pobre bajo condiciones de mucho polvo o anormales debido al desgaste de los anillos rozantes dispuestos sobre el eje del rotor. Este esquema no es apropiado para generación de potencia eléctrica en zonas aisladas o remotas, ya que necesita del suministro de la red eléctrica para mantener la excitación y generar el campo magnético en el entrehierro [2] [3].

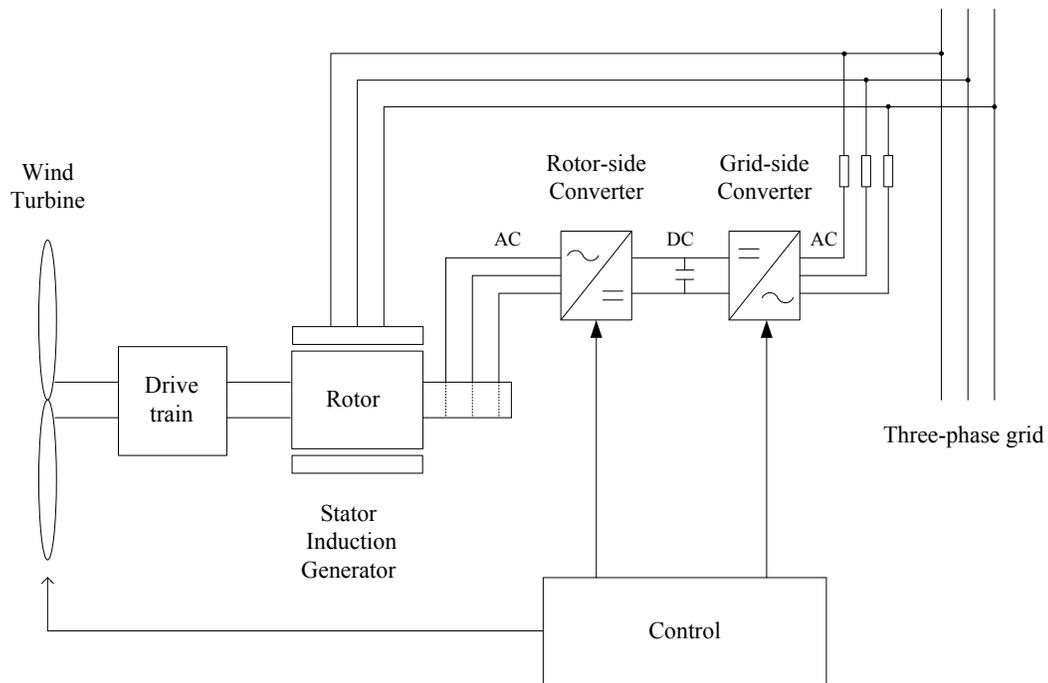


Fig. 2.3 Esquema/diagrama de un sistema DFIG con un aerogenerador (*Distributed Generation, 2007*).

2.3.3 Velocidad variable – Frecuencia variable

Si la velocidad del primo motor varía continuamente, el funcionamiento del generador sincrónico puede verse afectado. Para situaciones de velocidad variable el generador de inducción auto-excitado puede utilizarse, por ejemplo, en calentamiento de cargas resistivas las cuales son esencialmente insensibles a la frecuencia. En este trabajo se realiza el análisis del generador de inducción para aplicaciones en zonas aisladas o remotas, ya que este esquema está ganando mucha importancia tanto para aplicaciones eólicas como mini/micro hidráulicas, biogás, etc. [3].

2.4 Esquema de conexión y elementos del SEIG

Para hacer funcionar al generador de inducción auto-excitado se necesitan los siguientes elementos:

- El primo motor (motor de inducción trifásico, idéntico al generador).
- Acoplamiento mecánico.
- Variador de velocidad trifásica.
- Un banco de capacitores trifásico en conexión de estrella.
- Las distintas cargas trifásicas (resistivas, capacitivas, inductivas) en conexión de estrella para ver el comportamiento dinámico del generador.

Una máquina de inducción trifásica puede funcionar como un generador auto-excitado, cuando un primo motor hace girar su rotor a una velocidad apropiada, y la excitación necesaria para establecer el campo magnético giratorio en el entrehierro es suministrada conectando un banco trifásico de capacitores en las terminales del estator. El fenómeno de auto-excitación de la máquina de inducción puede o no ocurrir. Es decir, que incluso conectando capacitores a las terminales del estator de la máquina y haciendo girar el rotor, puede o no aparecer tensión en las terminales del generador. Los que determinan el proceso de auto-excitación son cuatro factores, estos son:

- 1) Los parámetros de la máquina.
- 2) La inductancia de magnetización.
- 3) Velocidad del primo motor.
- 4) Banco de capacitores.

2.4.1- Parámetros de la máquina.

Están determinados por el tipo de material de los devanados del estator, tipo de rotor (devanado, tipo jaula, doble jaula, de barras profundas), clase de diseño (NEMA, IEC), etc.

2.4.2.- Inductancia de magnetización.

Es el factor principal en el establecimiento, incremento y la estabilización de tensión en terminales en condiciones de vacío y con carga, y está determinada por el grado de saturación del material magnético.

2.4.3.- Velocidad del primo motor

Cuando el generador de inducción trabaja en vacío, existe una velocidad mínima para que el proceso de auto-excitación sea exitoso. Mientras que en condiciones con carga existen una velocidad mínima y una velocidad máxima. Por lo tanto, es necesario determinar en el caso general, la velocidad mínima necesaria para que el fenómeno de auto-excitación ocurra.

2.4.5 Banco de capacitores

Junto con la velocidad del primo motor, el tamaño del banco de capacitores (Faradios), es uno de los factores que pueden ser manejados para obtener la tensión requerida en condiciones de vacío y con carga. Sin embargo, con una velocidad seleccionada, existe también un valor mínimo de los capacitores para que se establezca una tensión en las terminales del generador.

2.5 Pruebas para la determinación de los parámetros de la máquina de inducción.

Los parámetros del circuito equivalente de la máquina de inducción son muy importantes para poder analizar la máquina. Pero estos parámetros son

desconocidos cuando la máquina es adquirida. Los métodos más comunes para determinar experimentalmente los parámetros de la máquina de inducción (R_s , R_r , L_s , L_r , L_m) son la prueba en vacío, la prueba de rotor bloqueado, la prueba de corriente directa y la de saturación magnética [4] [6].

2.5.1 Prueba en Vacío.

La prueba de circuito abierto o en vacío proporciona información acerca de la corriente de magnetización y las pérdidas rotacionales. La prueba se realiza aplicando la tensión nominal a los devanados del estator a la frecuencia nominal. Debido a que la única carga puesta sobre el motor es su propia fricción y el rozamiento con el aire, las pérdidas en la máquina se deberán a las pérdidas en el núcleo, por fricción y pérdidas en los devanados. La máquina gira casi a la velocidad sincrónica, por lo que el deslizamiento será muy pequeño (cerca de 0.001 o menos) y la resistencia del rotor muy grande. La potencia de entrada medida debe ser igual a las pérdidas en el motor. En vacío, la corriente del rotor es muy pequeña, tan solo para producir el par necesario para vencer la fricción y la resistencia aerodinámica, por lo que las pérdidas en el rotor son despreciables. Las pérdidas en el estator de la máquina no pueden despreciarse debido a la gran corriente de magnetización necesaria para establecer el campo magnético en el entrehierro. Los valores medidos durante esta prueba son la corriente de magnetización y su ángulo respecto a la tensión aplicada. La figura 2.4 muestra un diagrama de la conexión realizada durante la prueba [4] [6].

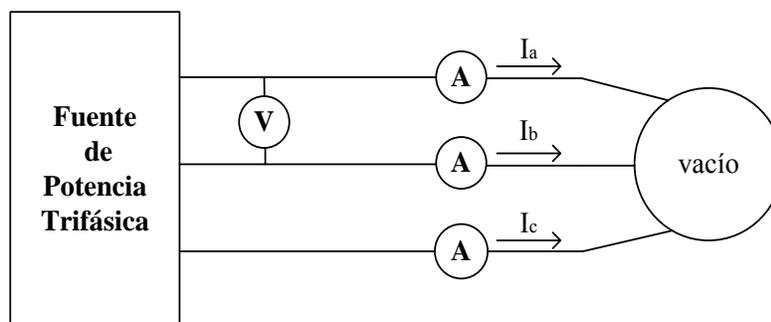


Fig. 2.4 Esquema de la Conexión realizada durante la prueba en vacío. (Chapman 2007).

2.5.2 Prueba de rotor bloqueado

La prueba de corto circuito o rotor bloqueado en una máquina de inducción proporciona información respecto a las impedancias de dispersión. Durante esta prueba, que corresponde a la de cortocircuito del transformador, se bloquea o se fija el rotor de tal forma que no pueda girar; se aplica una tensión al motor y se miden tensión, corriente y la potencia resultante.

La prueba de rotor bloqueado debe realizarse bajo condiciones de corriente y frecuencia del rotor, aproximadamente iguales a las condiciones de operación de la máquina [4].

El procedimiento de pruebas estándar IEEE-112B, sugiere una frecuencia de 25% de la frecuencia nominal para realizar la prueba. La reactancia de dispersión total a frecuencia nominal puede calcularse considerando que la reactancia es proporcional a la frecuencia. Los efectos de la frecuencia son por lo general despreciables para motores de potencia menores a los 18.5 kW, por lo que la impedancia a rotor bloqueado puede medirse directamente a frecuencia nominal. La importancia de mantener las corrientes medidas cerca de su valor nominal proviene del hecho de que las reactancias de dispersión son afectadas de manera significativa por la saturación. La figura 2.5 muestra un diagrama de la conexión realizada durante la prueba de rotor bloqueado.

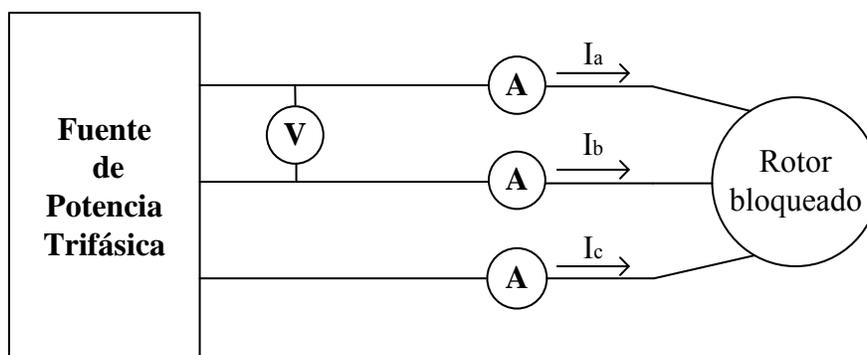


Fig. 2.5 Conexión realizada durante la prueba de rotor bloqueado (Chapman 2007).

2.5.3 Prueba de C.D.

La resistencia del rotor juega un papel crítico en la simulación y operación de un motor de inducción. Entre otras cosas, la resistencia del rotor determina la forma de la curva par-velocidad al establecer la velocidad a la cual ocurre el par máximo. Para determinar la resistencia total del circuito del motor, se puede aplicar la ya mencionada *prueba de rotor bloqueado*. Sin embargo, esta prueba determina sólo la resistencia total. Para estimar la resistencia aproximada del rotor, es necesario conocer la resistencia del estator de modo que ésta pueda restarse de la total [4].

Existe una prueba para la resistencia del rotor independiente de las reactancias de dispersión y la resistencia del estator, la cual se denomina *prueba cd*. Básicamente, se aplica una tensión cd a los devanados del estator del motor de inducción. Puesto que la corriente es cd, no hay una tensión inducida en el circuito del rotor y en éste no fluye corriente resultante. Asimismo, la reactancia a corriente directa del motor es cero. Entonces, la única cantidad que limita el flujo de corriente en el motor es la resistencia del estator y por tanto, ésta puede ser determinada.

Para realizar la prueba, se ajusta la corriente equivalente del estator a la corriente nominal y se mide la tensión en los terminales. La corriente en los devanados se ajusta al valor nominal para que los devanados se calienten a la misma temperatura que tendrían durante la operación normal (recuérdese que la resistencia del devanado es función de la temperatura). Conociendo este valor de la resistencia del estator se pueden determinar las pérdidas en el cobre del estator en vacío. La **Fig. 2.6** muestra el diagrama de la conexión realizado durante la prueba [2] [5].

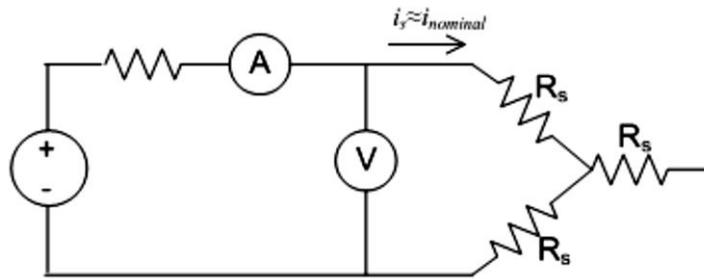


Fig. 2.6 Esquema de la conexión realizada durante la prueba en C.D. (Chapman 2007).

2.5.4 Prueba de Saturación Magnética

Cuando una máquina de inducción funciona como generador auto-excitado, la variación de la inducción de magnetización L_m es el factor principal en la dinámica de la tensión y su estabilización. La saturación magnética es la responsable de que la tensión generada en terminales, alcance un valor de estado estacionario. Existen diversas formas de incluir la saturación magnética en el modelo de la máquina de inducción [6].

Esta prueba consiste hacerlo girar al generador con el primo motor y alimentando al estator con una fuente de corriente alterna trifásica y una frecuencia nominal [6]. Los valores medidos en esta prueba son la tensión en los bornes del estator V_s y la corriente de magnetización I_m .

Concluida esas cuatro pruebas, los datos obtenidos, así como las siguientes ecuaciones se utilizaron para calcular los parámetros de la máquina de inducción.

Tabla 2.1. Parámetros calculados.

Parámetros del Generador de Inducción				
R_s	R_r	L_{ls}	L_{lr}	L_m
0.71852 Ω	1.42438 Ω	16.18 mH	16.18 mH	68.30 mH

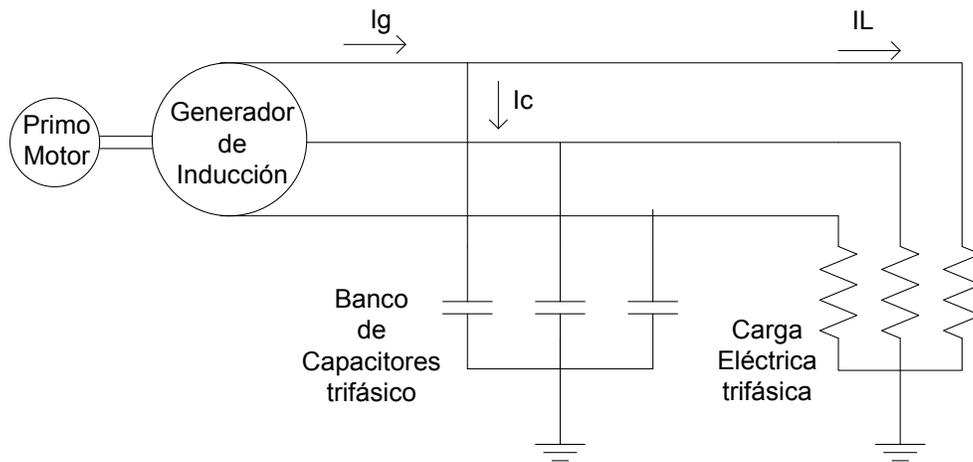


Fig. 2.7 Esquema de conexión del SEIG. (Yah, 2015).

La conexión consiste en conectar el primo motor y el generador con un acoplamiento mecánico en los ejes. La carga y el banco se conectan en paralelo con el generador. El Fluke 434 tiene puntas para medir tensión, que se conectan en las terminales del generador, así como también las puntas para medir la corriente que se conectan a la carga. El esquema se ve en la figura 2.7.

2.6 Instrumentación Requerida

Para realizar las pruebas al SEIG se utilizan varios equipos para monitorear el comportamiento dinámico de éste, así como también las tensiones, corrientes, armónicos, los diagramas fasoriales, las potencias y la velocidad de rotación etc. Los instrumentos son los siguientes:

- El FLUKE 434 Power Quality Analyzer- este equipo se utilizó para monitorear el comportamiento de frecuencia de generación, así como también la tensión, las corrientes, los armónicos, las potencias y los diagrama fasoriales.



Fig. 2.8 Fotografía del equipo Fluke 424 (Power Quality Analyzer) (Yah 2015).

- El tacómetro- utilizado para medir la velocidad a la que gira el generador.



Fig. 2.9 Fotografía del tacómetro digital (Yah 2015).

CAPÍTULO III: Construcción del Banco de pruebas del SEIG

Introducción

Los bancos de capacitores son equipos que regularmente se instalan en los sistemas eléctricos, tanto en baja como en media y alta tensión, ya que son de utilidad para corregir el factor de potencia y evitar las penalizaciones que la empresa suministradora impone, mejorar la tensión, principalmente durante condiciones de arranque de motores o conexión de cargas de gran magnitud, en este caso se utiliza para la operación del SEIG, ya que este le suministra la potencia reactiva necesaria para que ocurra la autoexcitación. El banco que se construyó nos permite hacer modificaciones de la cantidad de potencia reactiva por fases, ya que cada capacitor tiene su interruptor. Este también puede ser utilizado para fines didácticos.

3.1 Instalación y configuración del Variador de velocidad

El variador utilizado para este trabajo es un variador de velocidad trifásico de la marca Yaskawa, modelo V1000. El variador se programó para que girara al primo motor y éste a su vez impulsara al generador a una velocidad de 1800 rpm, así como también que arrancara al motor despacio para evitar picos de corriente en el sistema eléctrico. Esta velocidad es la que se utilizó para que el generador produjera energía eléctrica con una frecuencia de 60 Hz, ya que la frecuencia de generación también depende de la velocidad a la que gira el generador.



Fig. 3.1 Variador de velocidad. (Yah, 2015)

3.2 Sistema de acoplamiento mecánico (Primo motor- Generador)

Tanto el primo motor como el generador tienen conectado en su rotor un acoplamiento de hierro colado que en el interior tiene una forma de corona, como se observa en la figura 3.2, ambas máquinas están unidas mecánicamente utilizando un conector de goma, este se ve en la figura 3.3 y en la figura 3.4 se observan ambas máquinas acopladas y en funcionamiento.



Fig. 3.2. Acoplamiento que tiene ambas máquinas (Yah, 2015).



Fig. 3.3. Conector de goma (Yah, 2015).

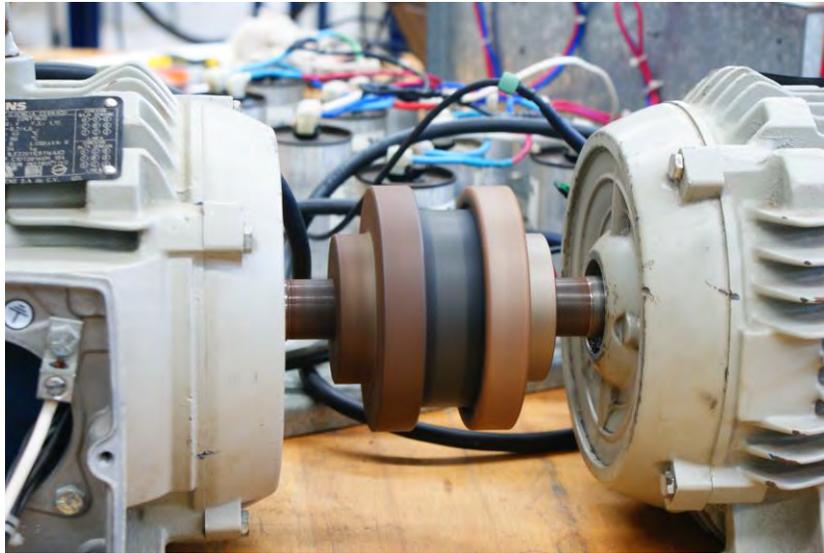


Fig. 3.4 Conexión del motor-generador (Yah, 2015).

3.3 Diseño y construcción del banco de capacitores

Para la construcción del banco de capacitores se utilizaron los siguientes materiales:

- Capacitores de régimen (5 μF , 10 μF , y 20 μF)
- Ángulos de 90° aluminio de 1" y de ½"
- Lámina de acero inoxidable
- Acrílico de 3 mm
- Cinta aislante Súper 33
- Estaño 60-20
- Silicón
- Pegamento cola loca
- Interruptores de cola de rata de 15A
- Interruptores trifásicos de 20A
- Cortador de acrílico
- Conectores hembra de 15A para 14 AWG
- Conectores tipo U de 20A para 12-10 AWG
- Resistencias de cerámica (330 Ω , Ω , Ω)
- Cinchos
- Cintas de distintos colores

- Cable de 14 AWG, 16 AWG y 10 AWG
- Remaches de 1/8"
- Barra de conexiones (5 y 24 espacios)
- Pijas de tabla roca de 3/4"

Para que se pudiera regular la cantidad de potencia reactiva que se le esté suministrando al generador por fase, se diseñó y construyó un nuevo banco de capacitores. Este banco fue diseñado para suministrar 200 mF por fase y que se pueda agregar o quitar capacitores de 5 mF, 10 mF, o 20 mF ya que cada capacitor tiene un interruptor para hacer esto.



Fig. 3.5 Capacitores utilizados (Yah, 2015).

Los capacitores utilizados son de régimen o de trabajo. Por seguridad se tuvo que calcular una resistencia adecuada para cortocircuitar las terminales para que se descarguen al momento de ser desconectados.



Fig. 3.6 Capacitores cortocircuitados con resistencias (Yah, 2015).

Primeramente se obtuvo una lámina de acero inoxidable pegada a una base de madera así se utilizó para que el banco tenga una base firme. Se cortó un cuadro de 0.5 m x 0.5 m, y un pedazo de 0.4 m x 0.5 m.

Se cortaron seis tramos de ángulos de aluminio de 0.5 m para los soportes. A cuatro piezas se les hizo un corte para que pudiera pasar la lámina que contiene la mitad de los capacitores utilizados. Ya teniendo esto se procedió a fijar los soportes a la base que es la lámina sobre la madera.



Fig. 3.7 Base para el banco, de lámina de acero inoxidable (Yah, 2015).



Fig.3.8 Base con los soportes de aluminio (Yah, 2015).

Se procedió a fijar los capacitores en las láminas de acero inoxidable usando silicón, debido a que son 65 capacitores en total se dividieron en 2, en la base se colocaron 32 capacitores y en la placa superior se colocaron 33 capacitores.



Fig. 3.9 Capacitores fijos en la placa (Yah, 2015).

Posteriormente se realizaron las conexión y la identificación de los capacitores, así como también agruparlos por fase para que finalmente sean conectados los apagadores tipo cola de rata.



Fig. 3.10 Identificación de los capacitores fijos en la placa. (Yah, 2015)



Fig. 3.11 Conexión de los capacitores e identificación de cada uno (Yah, 2015).

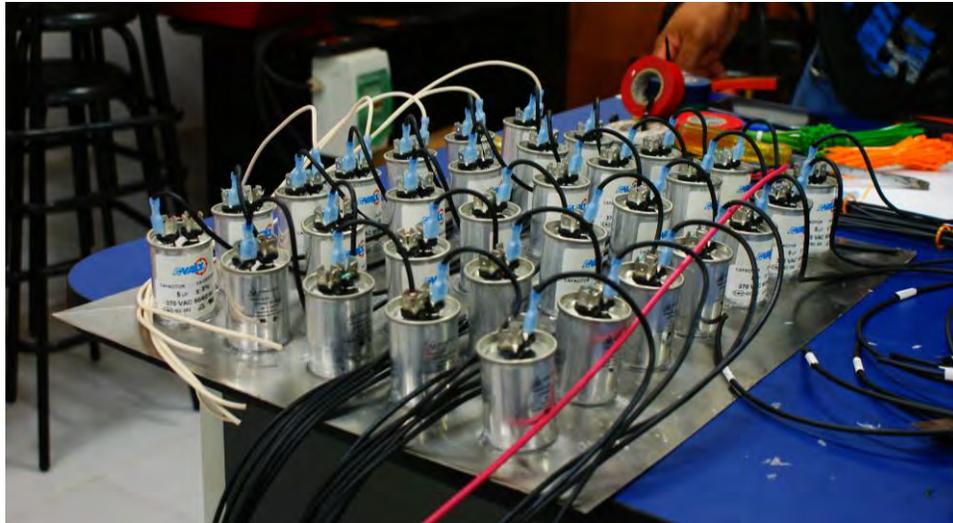


Fig. 3.12 Conexión de los capacitores e identificación de cada uno (Yah, 2015).

Para evitar accidentes debido a una descarga, se aterrizaron los capacitores a la estructura del banco; esto se hizo soldando un cable desnudo y que fuera uniando todos los capacitores para que al final se aterrizará con la estructura del banco.



Fig. 3.13 Conductor desnudo uniando todos los capacitores (Yah, 2015).

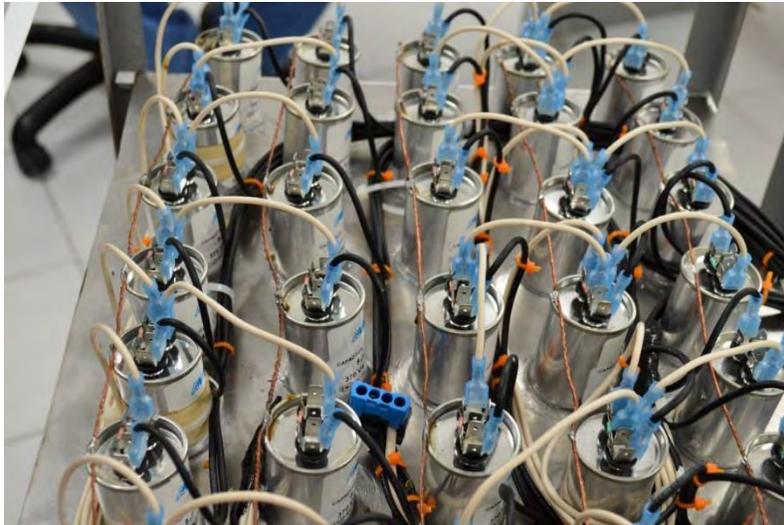


Fig. 3.14 Capacitores aterrizados (Yah 2015).

La tapa frontal que contiene todos los interruptores tipo cola de rata se hizo con acrílico de 3 mm. Se cortó un tramo de acrílico con dimensiones de 0.5 m x 0.4 m.



Fig. 3.15 Acrílico de dimensiones 0.5m x 0.4m (Yah 2015).

Teniendo la tapa lista se procedió a hacer los agujeros donde se colocaran los interruptores tipo cola de rata.



Fig. 3.16 Agujeros para los interruptores (Yah 2015).

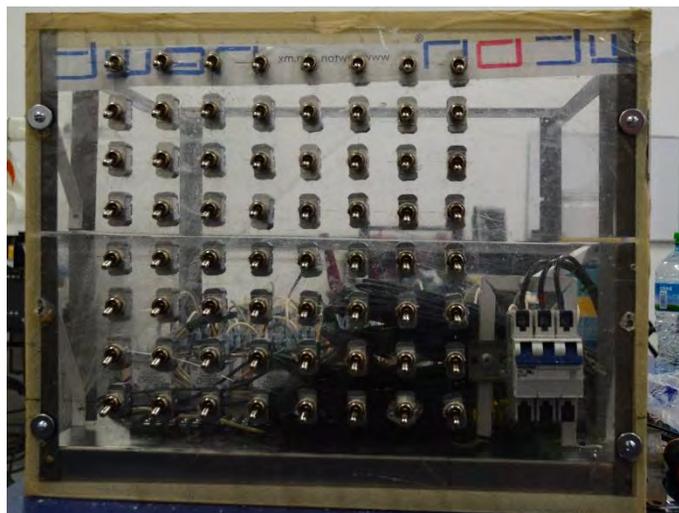


Fig. 3.17 Interruptores colocado es sus respectivos agujeros (Yah 2015).

Para tapar la parte superior y los laterales del banco se cortó acrílico a la misma medida de lo ancho del banco y la longitud es la suma de las distancias de cada lado (las laterales y la superior) se le hicieron dobleces para que éste quede más rígido y que sea una sola pieza.



Fig. 3.18 Tapa lateral y superior (Yah 2015).

Para realizar las conexiones internas de los capacitores se le asignó una barra de conexiones a cada fase y se hizo el puente para que los capacitores quedaran en serie. Y cada conductor de las fases se conectó al interruptor principal.

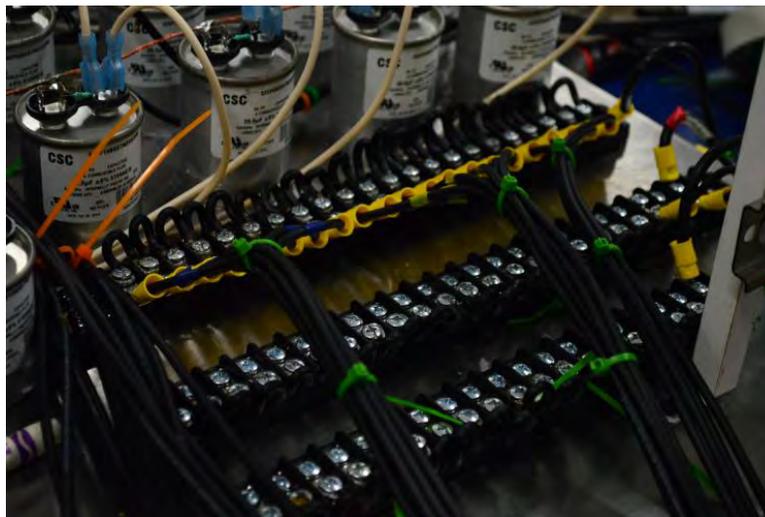


Fig. 3.19 Conexión interna de la fase A (Yah 2015).

Ya teniendo los capacitores conectados se agruparon de la forma que cada fase tenga la misma cantidad de micro Faradios. En total se adquirieron 63 capacitores,

24 piezas de 5 μF , 24 de 10 μF , y 15 de 20 μF . Al dividir entre las tres fases. Se obtuvo que cada fase tendrá un total de 220 μF . Estos 220 μF se suman usando 8 capacitores de 10 μF , 8 de 5 μF , y 5 de 20 μF .

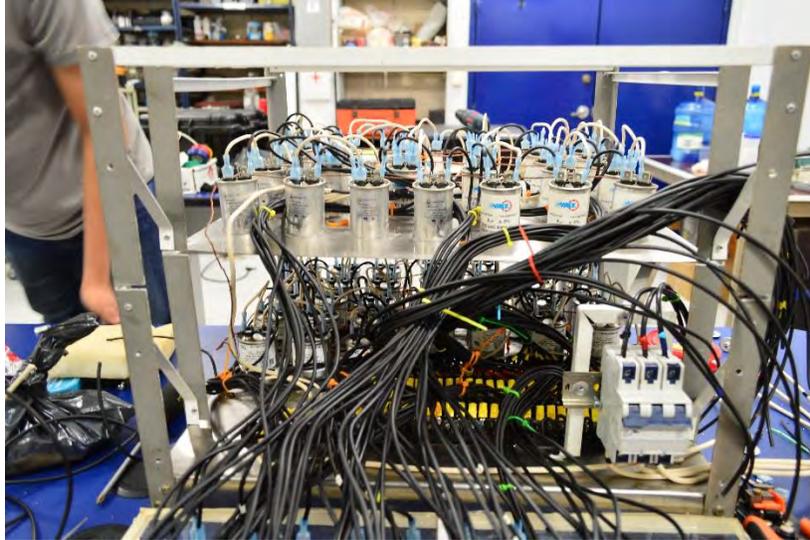


Fig. 3.20 Distribución de los capacitores (Yah 2015).

Ya agrupados los capacitores para su respectiva fase. Se procedió a realizar las conexiones correspondientes. Para esto se utilizaron 3 block de terminales de 24 espacios cada uno, así que se le asignó uno para cada fase. Y a cada interruptor cola de rata se le asignó un capacitor y fue marcado para ser identificado. Así como también se le colocaron cinchos de distintos colores para identificar de que capacidad son y a que fase pertenecen.

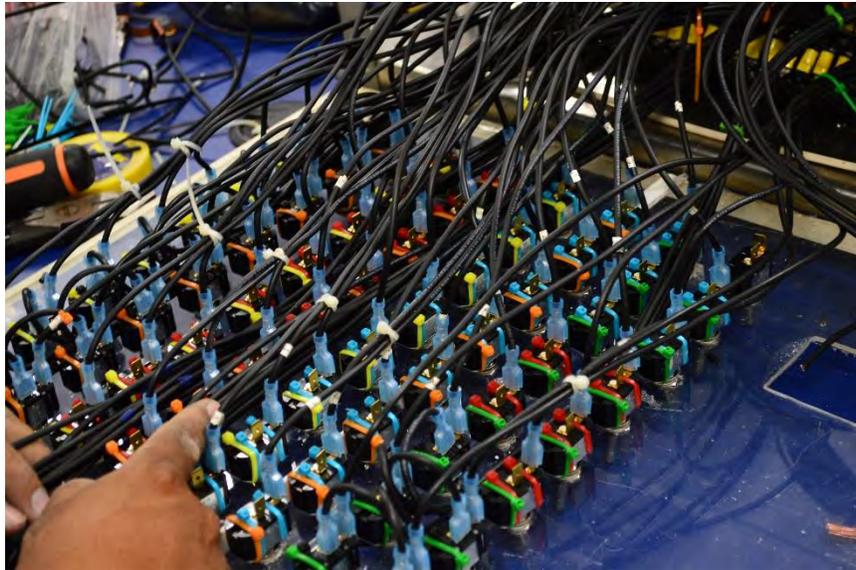


Fig. 3.21 Conexión de todos los capacitores con cada interruptor (Yah 2015).

Finalmente se procedió a fijar la tapa frontal donde se tienen todos los interruptores y el interruptor principal.

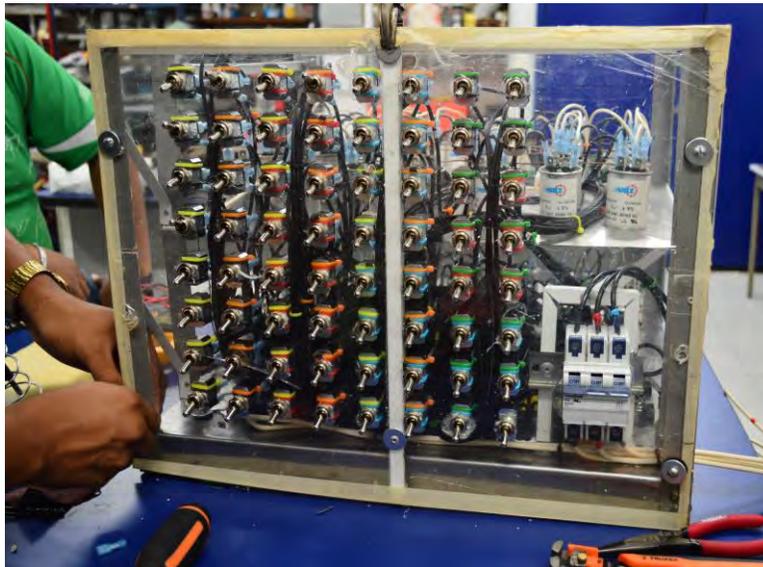


Fig. 3.22 Fijación de la tapa frontal (Yah 2015).

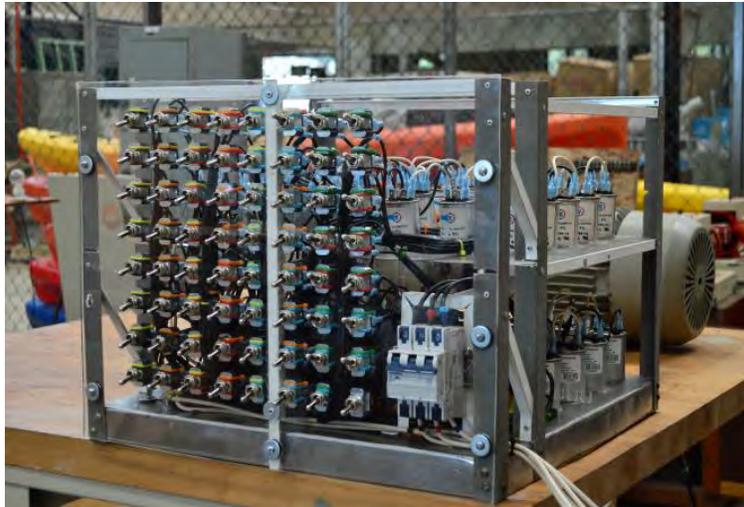


Fig. 3.23 Fijación de la tapa frontal (Yah 2015).

3.4 Ensamble de las cargas eléctricas

Las cargas eléctricas utilizadas son cargas trifásicas conectadas en estrella. Estas cargas son resistivas, inductivas y capacitivas. Se utilizaron estas cargas para que se pueda ver el comportamiento dinámico del generador para que posteriormente se compare.

3.4.1 Resistivas

Se utilizaron focos incandescentes para hacer las pruebas con cargas resistivas. Se usaron focos de 60 W y 75 W para hacer un arreglo trifásico con conexión en estrella, cada fase contiene 7 focos.

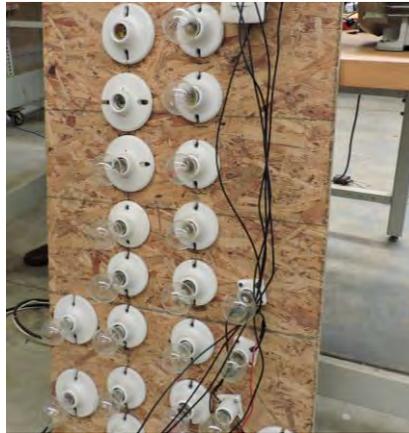


Fig. 3.24 Carga resistiva, focos incandescentes (Yah 2015).

3.4.2 Inductivas

La carga inductiva utilizada son unos módulos de un tutor de máquinas eléctricas. Estos módulos se conectaron en estrella para hacer las pruebas necesarias.

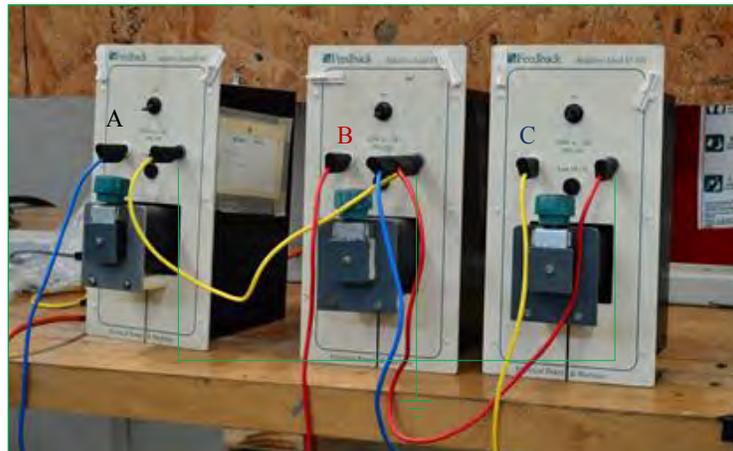


Fig. 3.25 Carga inductiva (Yah 2015).

3.4.3 Capacitiva

La carga capacitiva trifásica utilizada es un módulo que contiene capacitores de 4, 8 y 15 μF por fase. Como ya tiene las salidas, solo se hizo la conexión.

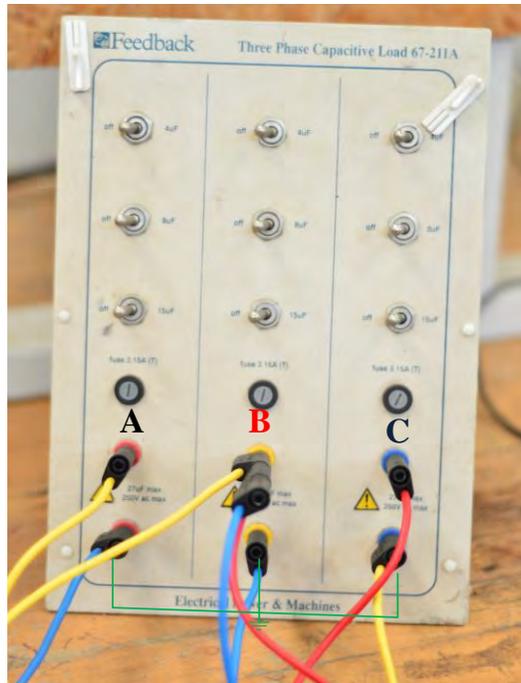


Fig. 3.26 Carga capacitiva (Yah 2015).

3.5 Procedimiento para la operación del SEIG

Para operar el SEIG primeramente se tiene que fijar tanto el motor como el generador en una superficie plana, esto es para la seguridad tanto del equipo como al usuario.

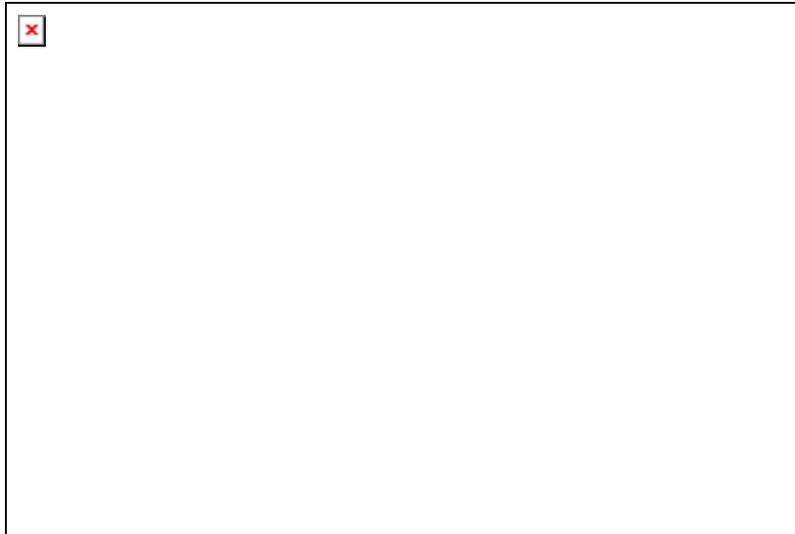


Fig. 3.27 Fijación de las máquinas (Yah, 2015)

Se fijó el variador de velocidad en una pared para que se utilizara adecuadamente. Este variador se alimentó con una fuente trifásica y luego el primo motor se alimentó por medio del variador de velocidad.



Fig. 3.28 Fijación del variador de velocidad (Yah, 2015).

Luego se conectó el banco de capacitores en los bornes del generador así como también las puntas de medición del FLUKE 434.



Fig. 3.29 Conexión del banco de capacitores y el equipo de medición (Yah, 2015).

Se conectó la carga en las terminales de salida del generador. Pero se mantuvo apagado hasta para cuando sea necesario encenderla.

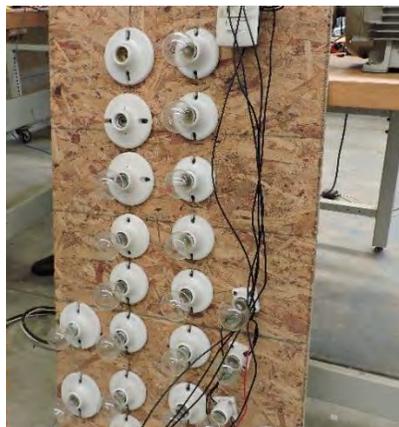


Fig. 3.30 Conexión de la carga (Yah, 2015).

Se encendió el variador de velocidad y se programó para que girara al primo motor a 1800 rpm, así también el generador girara a esa velocidad. La velocidad de giro se midió con el tacómetro.



Fig. 3.31 Generador en funcionamiento. (Yah, 2015).

Para empezar a excitar al generador se le agregaron $80 \mu\text{F}$ por fase. Con estos $80 \mu\text{F}$ se logra obtener una tensión generada de 122 V en promedio por fase. Esta tensión es monitoreada con el Fluke, así como también la frecuencia, esta se debe mantener cerca de los 60 Hz . Se guardan los datos de tensión, frecuencia, cantidad de capacitores conectados, velocidad de rotación.

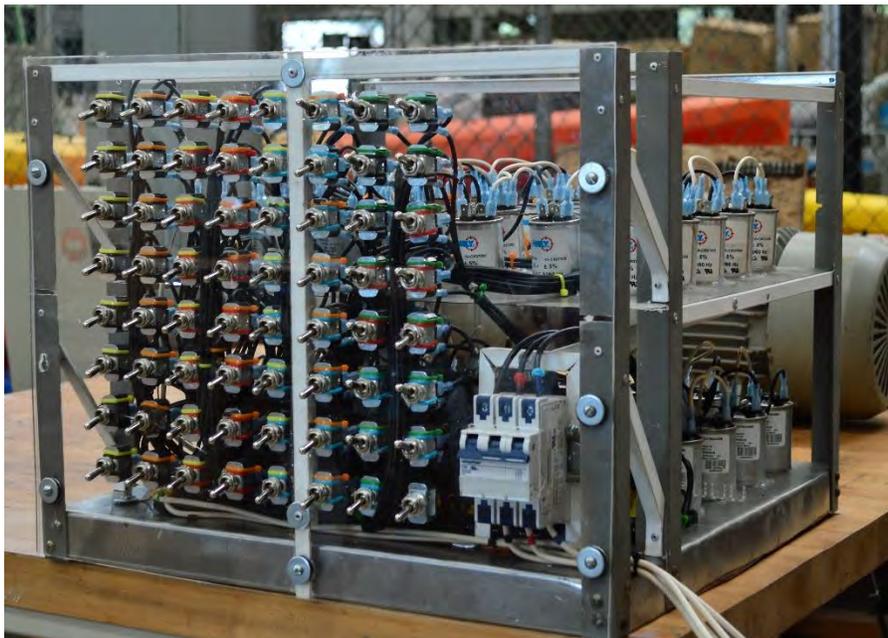


Fig. 3.32 Capacitores conectados para excitar al generador (Yah, 2015).

Ya teniendo la tensión requerida se encendió la carga conectada. Se analizó el comportamiento dinámico del SEIG, y se compensó lo que disminuyó, ya sea la tensión o frecuencia, con más potencia reactiva o aumentando la velocidad de giro dependiendo de lo que se requiera,



Fig. 3.33 Carga encendida (Yah, 2015).

CAPÍTULO IV Puesta en operación del banco de pruebas

Introducción

Las pruebas eléctricas se realizaron para cada carga, y los parámetros que se fueron monitoreados son la velocidad de giro del motor, la tensión en las terminales, la corriente, las potencias (reactivas, aparente y real), el factor de potencia y los diagramas fasoriales.

Ya teniendo las cargas que se utilizaran y el banco de capacitores. Las pruebas se realizaron para ver el comportamiento dinámico del SEIG, así como también poner en operación el banco de capacitores que se construyó. En la literatura casi no se encontró información sobre el comportamiento de SEIG con cargas capacitivas y por eso igual se realizaron estas pruebas para que posteriormente pueda ser utilizada como material didáctico.

4.1 Metodología para hacer las pruebas

1. Se enciende el variador de velocidad con una frecuencia de 60 Hz. La carga se mantiene apagada y con 80 μF en cada fase.
2. Se toma lectura de la tensión, velocidad de rotación, capacitancia utilizada y la frecuencia a la que está el variador.
3. Se enciende la carga. En dado caso que disminuya la tensión, se le agregan capacitores para mantener la tensión cerca de los 120 V. Si disminuye la frecuencia se aumenta la velocidad aumentando la frecuencia en el variador. O si en vez de disminuir, aumenta se hace lo inverso, que es quitar capacitores o bajar la velocidad.
4. Tomar lectura de los nuevos valores de los parámetros mencionados en el paso 2, así como también las corrientes y las potencias.
5. Se captura las pantallas del Fluke.
6. Se hace lo mismo para distintas cargas.

Para monitorear el comportamiento de las tensiones, corrientes, se configura el FLUKE 434 para que haga la medición a un sistema trifásico en estrella con el neutro conectado a tierra, como se ve en la figura 4.1 los parámetros dados son, frecuencia a 60 Hz, tensión nominal 130 V.

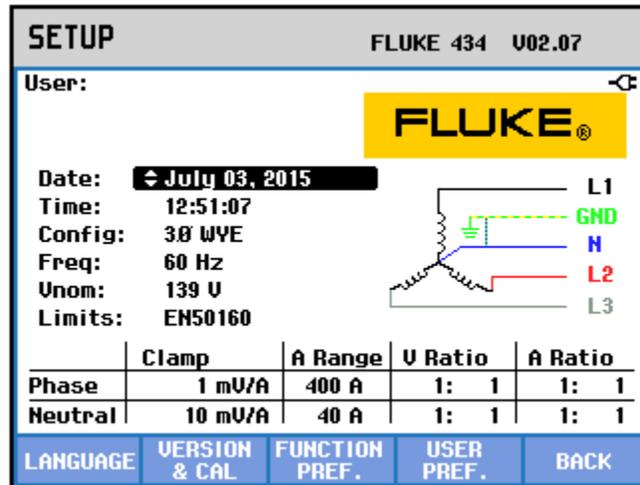


Fig. 4.1 Configuración del FLUKE. (Yah 2015).

4.2 En Vacío

Para la prueba en vacío el generador se puso en operación como se explicó en la sección 3.5, las pruebas se realizaron como se explicó en la sección 4.1. En este caso no se encendió la carga y se guardaron los datos de los parámetros monitoreados, esto es para analizar el comportamiento del generador sin carga y para posteriormente compararla con los datos obtenidos teniendo cargas conectadas. En la tabla 4.1 se encuentran los datos de velocidad de rotación (ω), microfaradios conectados (C), frecuencia de operación del primo motor (f_v), estos son los parámetros que se estuvieron manejando para tener una tensión y frecuencia cerca de la nominal. Es decir 120 V por fase y una frecuencia de 60 Hz. y la tensión generada promedio (V_{prom}). En vacío no hay corrientes y potencias, ya que no se tiene ninguna carga conectada. La figura 4.2 es una captura de pantalla del equipo de medición donde se muestran las forma de onda de la tensión generada así como también la tensión en cada fase, en este caso se tenía una tensión generada promedio de 125.13 V.

Tabla 4.1 Datos de la prueba en vacío (Yah 2015).

Vacío	
W	1797 rpm
C	80 μF
f_v	60 Hz

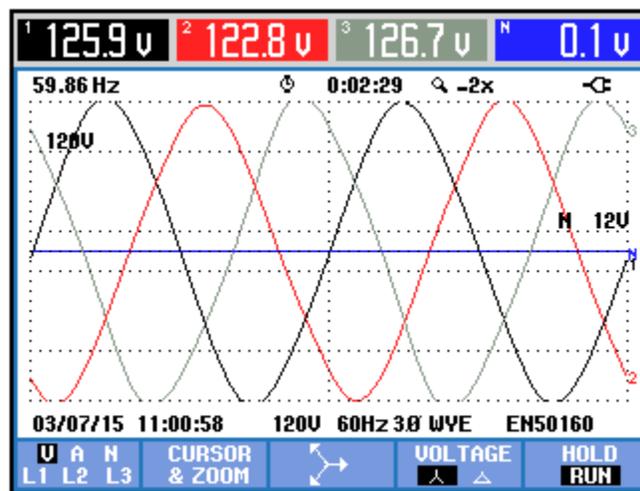


Fig.4.2 Tensión generada en vacío (Fluke 2015).

4.3 Resistiva

Ya teniendo los datos del comportamiento del SEIG en vacío se procedió a hacer lo mismo pero ahora con la carga resistiva conectada. En la tabla **4.2** están los parámetros de capacitancia, velocidad de giro y frecuencia utilizada para la operación del SEIG con carga resistiva. Comparando los datos de la prueba en vacío con estos, se observó que al momento de conectar la carga, disminuyó la tensión generada, así como también la frecuencia, y aquí ya se tenía una lectura de potencias y corrientes. Para compensar esta caída de tensión se agregaron 15 μF a cada fase para poder mantener la tensión cerca de los 120 V nominales, en este caso se obtuvo una tensión de 122.03 V promedio, lo cual es aceptable. En

total se tenía 96 μF por fase. La frecuencia en el variador de velocidad se tuvo que ajustar en 62 Hz, para tener una frecuencia de 60.09 Hz.

Tabla 4.2 Resultados con carga resistiva (Yah 2015).

Carga Resistiva	
W	1827 rpm
C	95 μF
f_v	62 Hz

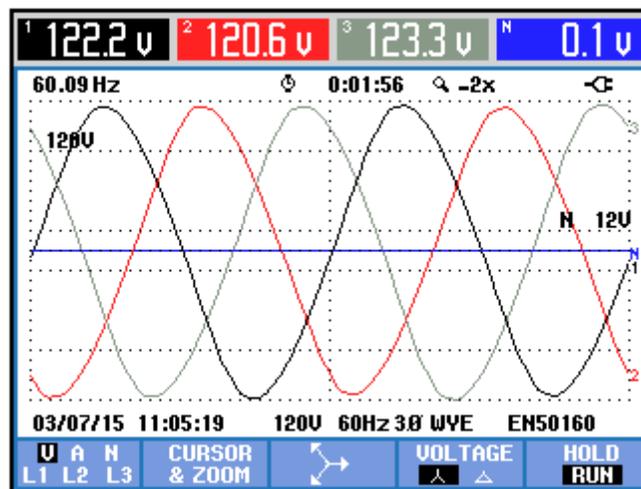


Fig. 4.3 Tensión con carga resistiva (Yah 2015).

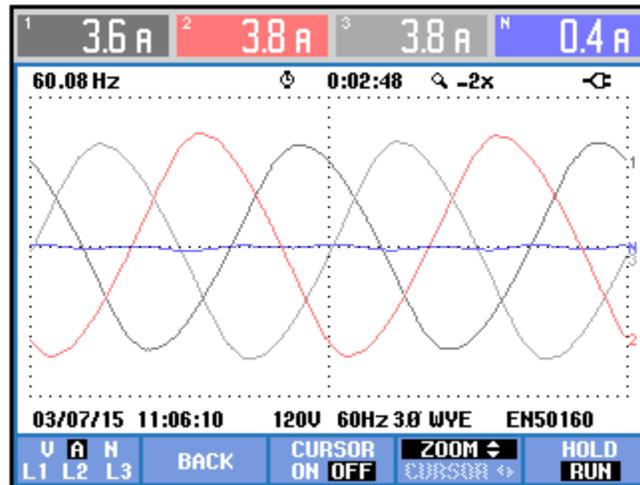


Fig. 4.4 Corrientes con carga resistiva (Yah 2015).

Como es una carga puramente resistiva las potencias real y aparente son practicamente iguales como se presenta en la figura 4.5 y la potencia reactiva era casi cero. Esto tambien se ve reflejado en el diagrama fasorial, como se aprecia en la figura 4.6. Las tensiones estan en fase es decir estan desplazados a 120° electricos de cada uno. Asi como tambien las corrientes son iguales, esto quiere decir que la carga se encuentra balanceada. La potencia de la carga conectada es de 1.35 kW, como se representa en la figura 4.5. tambien se tiene un factor de potencia igual a 1, ya que toda la energia suministrada es utilizada, o transformada en forma de iluminacion y calor. En cuanto a los armonicos de tension, solo se encuentra el 1^{er} armonico que es la fundamental, y el 3^{ro} y 5^{to} armonicos estan presentes pero no afecta a nuestro sistema.



Fig. 4.5 Potencia con carga resistiva (Yah 2015).

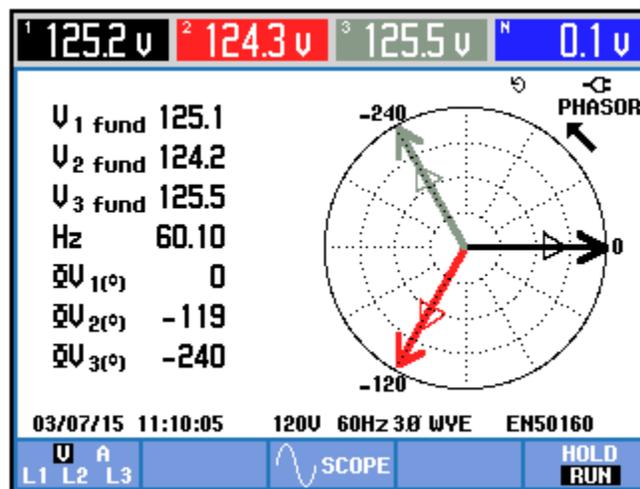


Fig. 4.6 Diagrama fasoriales con carga resistiva (Yah 2015).

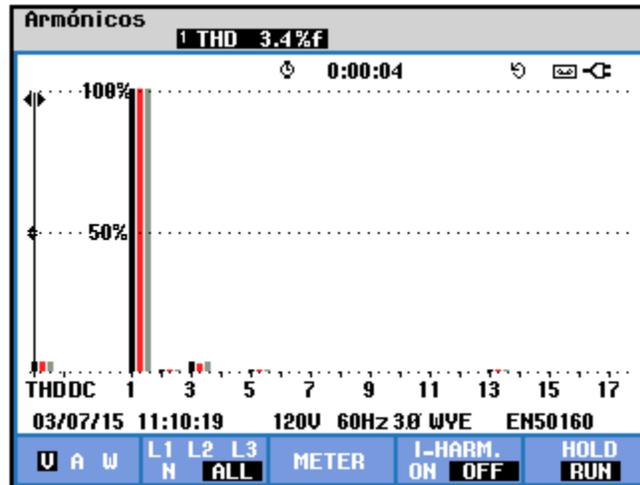


Fig. 4.7 Armónicos de tensión con carga resistiva (Yah 2015).

4.4 Inductiva

En la tabla 4.2 se encuentran los datos de velocidad de rotación, capacitancia y frecuencia usadas para el SEIG con una carga inductiva. Las pruebas se hicieron de la misma manera que la anterior, como se indica en la sección 4.1. Al momento de encender la carga, la tensión y la frecuencia disminuyeron. Por lo que se tuvo que agregar 20 μF a cada fase para compensar esta caída y poder mantenerla en 122.03 V promedio. En total se le agrego 100 μF al sistema. La frecuencia bajo a los 59.84 Hz pero como está cerca de los 60 Hz no se le modifico. Las corrientes son muy bajas ya que en promedio era 0.93 A por fase.

Tabla 4.3 Resultados con carga inductiva (Yah, 2015).

Carga Inductiva	
W	1797 rpm
C	100 μF
f_v	60 Hz

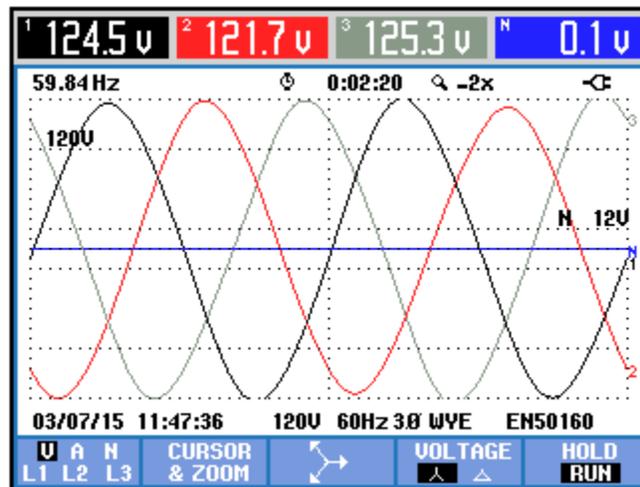


Fig. 4.8 Tensión con carga inductiva (Yah 2015).

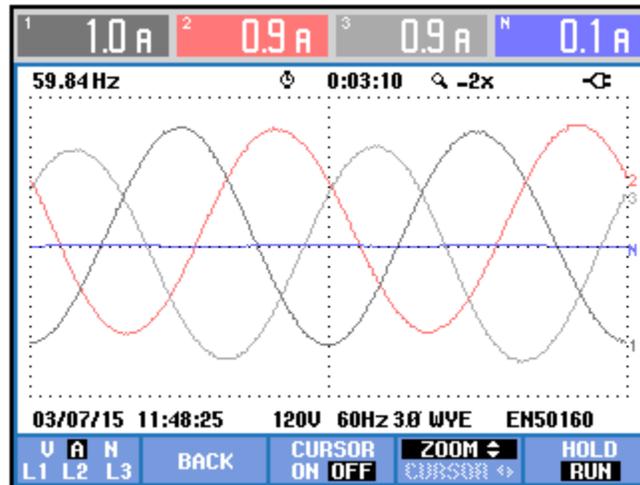


Fig.4.9 Corrientes con carga inductiva (Yah 2015).

La potencia total era de 3 W, en este caso como es una carga inductiva se tiene que las potencias aparente y reactiva eran iguales. La potencia reactiva es una potencia inductiva. Esto también se ve reflejado en el factor de potencia ya que comparado con la carga resistiva se tenía una gran diferencia, en este caso se tuvo un F.P de 0.04, lo cual es muy bajo. Pero esto es común en cargas inductivas, ya que requieren mucha energía para formar su campo magnético. En cuanto al diagrama fasorial la corriente se atrasó 90° eléctricos, con respecto a la tensión, lo que es común en una carga inductiva.

Potencia y energía				
	FUND			
	L1	L2	L3	Total
kW	0.00	0.01	0.01	0.03
kVA	0.12	0.11	0.12	0.35
kVAR	0.12	0.11	0.12	0.35
PF	0.04	0.05	0.12	0.07
Cos ϕ	0.04	0.06	0.12	
A rms	1.0	0.9	0.9	
	L1	L2	L3	
V rms	124.6	121.7	125.3	
03/07/15 11:49:48 120V 60Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

Fig. 4.10 Potencias con carga inductiva (Yah 2015).

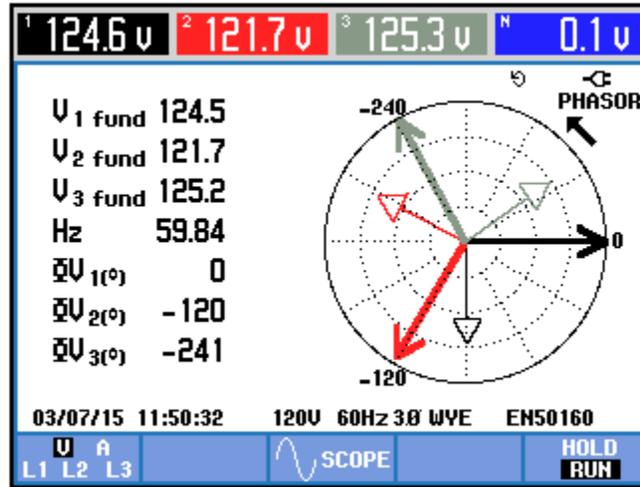


Fig. 4.11 Diagrama fasorial de tensión con carga inductiva (Yah 2015).

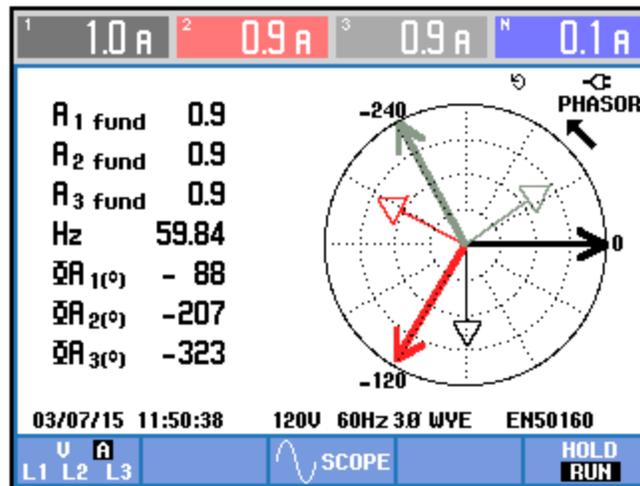


Fig. 4.12 Diagrama fasorial de corriente con carga inductiva (Yah 2015).

4.5 Capacitiva

En la tabla 4.3 se encuentran los datos usados con carga capacitiva. En este caso no hubo cambio en la frecuencia de la tensión generada. Hubo un incremento en la tensión, esto es porque se tiene dos fuentes de potencia reactiva, como la tensión depende de la cantidad de potencia reactiva en el sistema, entonces se aumentó la tensión. Tampoco se encendió toda la carga ya que si se tuviera una tensión grande, el generador corre riesgo de que se sature y deje de funcionar como generador. Por eso es que comparado con las otras 3 pruebas que se realizaron, la tensión es mayor con carga capacitiva que con las otras cargas. La corriente no es grande porque la carga era pequeña, en total solo se encendieron 12 μF por fase, ya que si se le agrega mucha potencia reactiva al generador, corre riesgo de que desmagnetice, entonces se tendría que hacer funcionar como motor para que se volviera a magnetizar. La forma de onda de las corrientes no es puramente senoidal, esto es debido a la carga conectada.

Tabla 4.4 Resultados con carga capacitiva (Yah, 2015).

Carga Capacitiva	
W	1796 rpm
C	100 μF
f_v	60 Hz

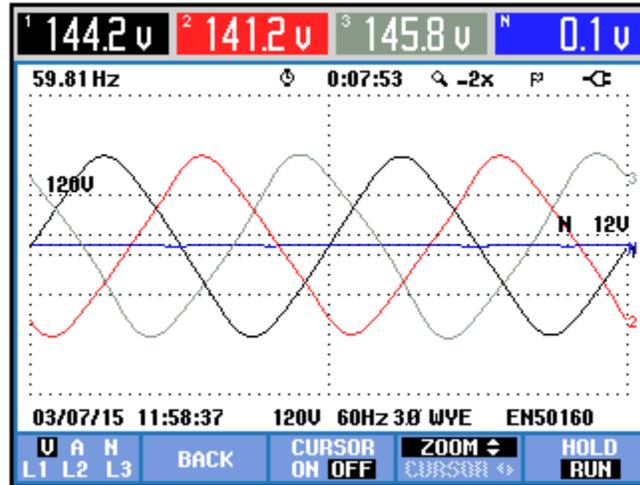


Fig. 4.13 Tensión generada con carga capacitiva (Yah 2015).

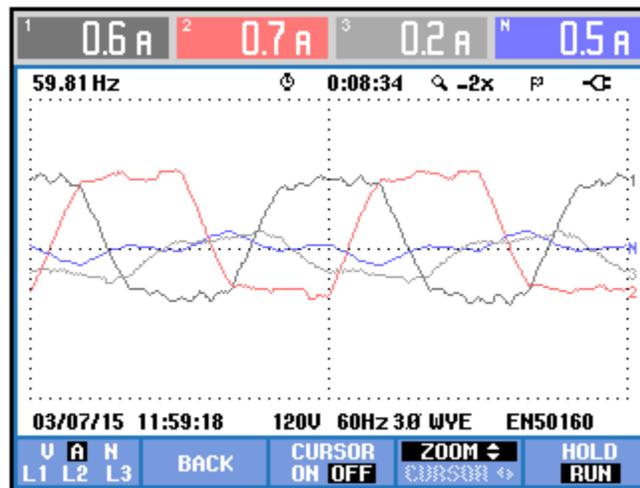


Fig. 4.14 Corriente con carga capacitiva (Yah 2015).

Con respecto a las potencias, la potencia real era cero. Ya que al aplicar la fórmula para calcular la potencia real. $P = I \cdot V \cdot \cos(\phi)$ donde $\phi = 90^\circ$, que es igual a cero. Las potencias aparente y reactiva son el mismo. Y la potencia reactiva es capacitiva. El factor de potencia es casi cero. En cuanto al diagrama fasorial de corriente, que es la figura 4.17 se tiene que esta se encuentra adelantado 90° eléctricos, inverso a lo que sucede con una carga inductiva.



Fig. 4.15 Potencias con carga capacitiva (Yah 2015).

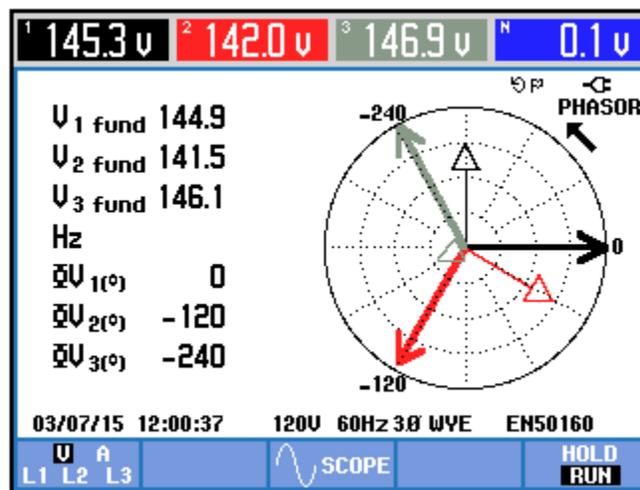


Fig. 4.16 Diagrama fasorial de tensión con carga capacitiva (Yah 2015).

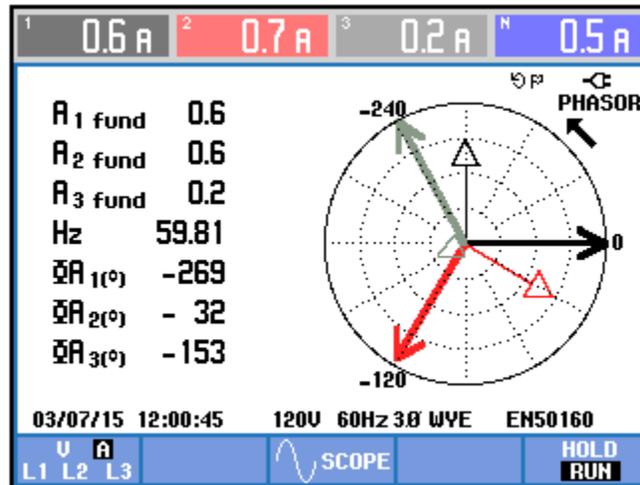


Fig. 4.17 Diagrama fasorial de corriente con carga capacitiva (Yah 2015).

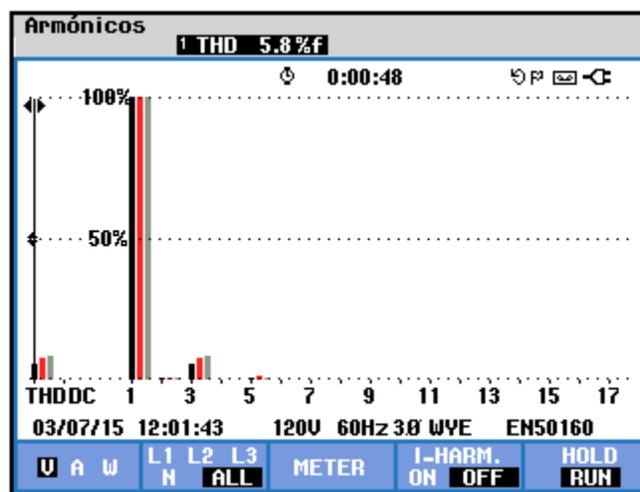


Fig. 4.18 Distorsión armónica de tensión con carga capacitiva (Yah 2015).

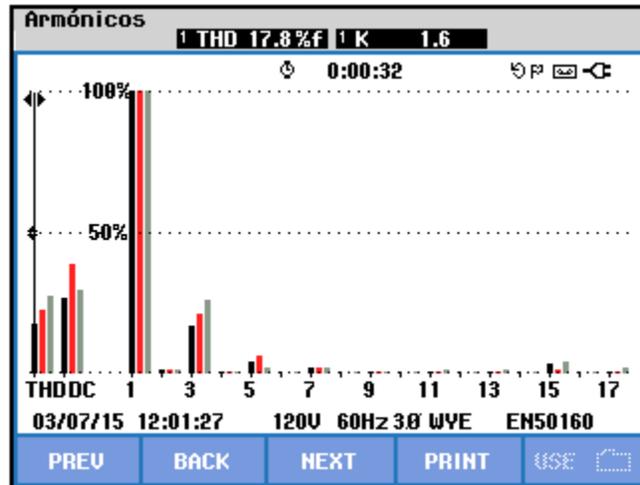


Fig. 4.19 Distorsión armónica de corriente con carga capacitiva (Yah 2015).

4.6 Análisis del comportamiento con las 3 cargas

Al terminar con las pruebas se observó que la carga que necesitaba más potencia reactiva para obtener la tensión nominal de 120 V es la inductiva; a la capacitiva se le agrego el mismo cantidad de capacitores pero no se le encendió toda la carga, por lo que si se le hubiera encendido todo iba ser necesario desconectarle capacitores, ya que la tensión generada iba ser mucha, y esto pudiera dañar tanto al generador como a la carga. Esto se daba porque se podría ver como si son dos fuentes de potencia reactiva, entonces el efecto es un aumento en la tensión. Con respecto a la velocidad de giro, la carga resistiva es la que necesito más ya que, la frecuencia es modificada con la velocidad de giro del generador, con las otras dos cargas se utilizó la misma velocidad ya que estos se mantuvieron cerca de los 60 Hz. En cuanto a los diagramas fasoriales, con carga resistiva no se tenía desfaseamiento, con carga inductiva se tenía que la corriente estaba adelantada 90° eléctricos con respecto a la tensión, lo que es común con una carga inductiva, en el caso de la carga capacitiva ocurría al revés, la corriente se adelantaba 90° eléctricos con respecto a la tensión.

CAPITULO V: Conclusiones

El diseño y construcción del banco de pruebas se realizó a raíz de que éste tiene una manera más práctica de manejar la tensión generada, lo cual el banco anterior no permitía. Así como también las pruebas del comportamiento del SEIG con tres distintas cargas, y esto radica en el hecho de que tienen diversas aplicaciones en energías renovables como la eólica, mini/micro-hidráulica, por lo cual al determinar su comportamiento se puede decidir si es o no es apropiado para alguna aplicación específica. En esta investigación se presentan de manera gráfica el comportamiento del SEIG con distintas cargas. El comportamiento obtenido coincide con la revisado en la literatura, sin embargo, se realizó un análisis más detallado, ya que se analizaron parámetros como la distorsión armónica, y los diagramas fasoriales que también se presentan en forma de imágenes.

En cuanto a las aplicaciones del banco de pruebas, éste se puede utilizar para fines didácticos en materias como la de circuitos eléctricos, así como también en instalaciones eléctricas, en máquinas eléctricas para prácticas como corrección de factor de potencia y analizando el comportamiento del generador de inducción auto-excitado. Con este trabajo realizado se pueden hacer otros proyectos a futuro, como hacer un controlador para un uso específico y así se pueda usar en conjunto con el banco de capacitores, así como también en sistemas híbridos.

Bibliografía

1. *La Jornada*. Obtenido de La Jornada: <http://www.jornada.unam.mx>
2. Loi Lei Lai, D. T. (2007). *Distributed Generation: Induction and Permanent Magnet Generators*.
3. Emmanuel Torres Montalvo, F. C. (1 de Diciembre de 2010). Analisis Dinamico del Generador de Induccion Auto-excitado. *RIEE&C*, pág. 7.
4. Chapman, S. J. (2003). *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill.
5. C Grantham, F. R. (s.f.). A Self-Excited Induction Generator with Voltage Regulation for use in a Remote Area Powe Supply.
6. M. Godoy Simoes, F. A. (2004). *Renewable Energy Systems: Design and Analysis with Induction Generators*. CRC Press.
7. Robert Foster, M. G. (2010). *Solar Energy*. New York: CRC Press.
8. Rodrigo, J. A. (2011). *El Generador de Induccion Autoexcitado*. Barcelona: Marcombo, S.A.
9. “Principales Plantas de Energía en México”, www.explorandomexico.com.mx, Julio 2015.
10. “CFE y la electricidad en México”, www.cfe.gob.com, Julio 2015
11. “Viento en números”, <http://www.amdee.org>, Julio 2015.
12. “Energías Renovables” <http://cfe.mx>, Agosto 2015.
13. “Energías renovables en México” www.energia.gob.mx, Agosto 2015
14. “Energía geotérmica una de las apuestas fuertes del futuro” www.elfinanciero.com.mx. Agosto 2015.
15. “Renovables verdes” www.renovablesverdes.com. Agosto 2015.