



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

Análisis Dinámico del Generador de Inducción Auto-Excitado con cargas lineales y no lineales

Tesis

para obtener el grado de

Ingeniero en Sistemas de Energía

Presenta

Joan Alba Aguilar

Director de Tesis

M.C. Emmanuel Torres Montalvo

Asesores

Dr. Freddy Ignacio Chan Puc

Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta

Chetumal, Quintana Roo, México, Noviembre de 2012.



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 Tesis

Director:

M.C. Emmanuel Torres Montalvo

Asesor:

Dr. Freddy Ignacio Chan Puc

Asesor:

Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta

Chetumal, Quintana Roo, México, Noviembre de 2012.

Dedicatoria

Le dedico este trabajo a mi querida abuelita Angélica Salazar de Aguilar y a mi madre Angélica Ma. Aguilar Salazar ya que les debo más de lo que puedo expresar con palabras y no estaría aquí si no fuera por esas dos grandes mujeres en mi vida.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a mi tutor el M. C. Emmanuel Torres Montalvo y al Ing. Gabriel Enrique Chan González por su gran apoyo y contribución para este proyecto.

A todos mis profesores que contribuyeron a mi formación hasta el día de hoy.

A mi pequeña familia que aunque no es mucha es toda la familia que necesito.

A la CFE y al ingeniero Raúl Xilo Fuentes que me permitieron realizar mi estancia profesional en la empresa.

Universidad de Quintana Roo, División de ciencias e ingeniería.

A mis verdaderos amigos Jouharra Jou, David Marín, Ismael Marín, Gerardo Pérez, Fabiola Pérez, Carlos Vadillo, Carlos Góngora, Ricardo Góngora, Axel Zetina, Jesica Domínguez, Alberto Escobio, Samuel Oviedo, Francisco Vivas y Adán Llanes con los que puedo contar para las buenas y malas noticias.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	2
OBJETIVO	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPITULO I.- PAPEL DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN AUTO-EXCITADO (GIAE) EN EL ESCENARIO ENERGÉTICO MUNDIAL	4
1.1 SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL.....	4
1.2 SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DISTRIBUIDOS	4
1.3 EL GENERADOR DE INDUCCIÓN Y LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA	5
CAPITULO II.- EL GENERADOR DE INDUCCIÓN AUTO-EXCITADO (GIAE)	7
2.1 PRUEBAS ELÉCTRICAS AL MOTOR	7
2.1.1 Prueba de vacío	8
2.1.2 Prueba corriente directa (CD) para determinar la resistencia del estator	11
2.1.3 Prueba de rotor bloqueado	15
2.2 CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE DEL BANCO DE CAPACITORES	21
2.3 INSTALACIÓN Y MANEJO DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.....	22
2.4 SISTEMA DE ACOPLAMIENTO DE LOS MOTORES.....	23
2.5 EQUIPOS DE MEDICIÓN	25
2.6 SISTEMA COMPLETO DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN AUTO-EXCITADO	26
CAPITULO III.- ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DINÁMICO BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN.	27
3.1 PRUEBA DE VACÍO.....	28
3.2 PRUEBA DE CARGA RESISTIVA LINEAL.....	30
3.3 PRUEBA DE CARGA INDUCTIVA LINEAL	33
3.4 PRUEBA COMPARATIVA CARGA LINEAL Y NO LINEAL.....	38
CONCLUSIONES	42
BIBLIOGRAFÍA	44
ANEXOS	47

Introducción

En la actualidad la energía eléctrica es indispensable, puesto que con ella mantenemos nuestra forma de vida y estatus de confort. Desde la revolución industrial el uso de ésta se ha incrementado exponencialmente llegando a un punto en el cual toda la industria cuenta con sistemas de producción y transporte dependientes de la energía.

Es de conocimiento general para las personas el hecho de que la fuente principal para la producción de energía eléctrica desde su descubrimiento hasta la actualidad son los combustibles fósiles, y que el consumo de estos son los que producen mayor contaminación y daño al planeta. Sin embargo, aunque nos empeñáramos en seguir abusando del consumo de los combustibles fósiles estos se están agotando, lo cual nos orilla a una crisis energética, más siendo los humanos los seres con mayor adaptabilidad ¿porque seguimos optando por consumir los recursos fósiles en vez de energía alternativa?. La respuesta a esto son los costos, por ello un gran objetivo para las personas que laboramos en el campo de las energías renovables es trabajar en la forma de reducir los costos de producción de energía por medios renovables y mejorar su eficiencia, de esta manera tendremos un producto más atractivo para la inversión y así avanzar hacia un futuro energético limpio y sin crisis.

Una de las posibles y viables soluciones a esta crisis energética en los lugares aislados de las redes eléctricas es el uso del generador auto-excitado el cual debido a la ausencia de escobillas y de una fuente de corriente directa separada, bajo costo, mejor estabilidad, construcción sencilla, mantenimiento mínimo, robustez y autoprotección lo hacen el generador apropiado para aplicaciones con Fuentes de renovables de energía [1], por ejemplo la minihidráulica, microhidráulica y eólica.

Justificación

El aumento en los costos de los combustibles fósiles así como su efecto contaminante hacia el ambiente y la incertidumbre de su disponibilidad a corto o mediano plazo han impulsado el desarrollo de las fuentes de energía renovable como la solar, eólica y la mini/micro-hidráulica. En poblaciones alejadas de la red eléctrica y que cuentan con recursos hidráulicos como pequeños ríos es factible la generación de la energía eléctrica distribuida, es decir, generar la energía eléctrica en el lugar donde se requiere, [2-4]. 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 a las terminales del estator un banco trifásico de capacitores,[5].

Este trabajo presenta un análisis con base en datos experimentales sobre el comportamiento dinámico del generador de inducción con cargas resistivas, cargas inductivas y cargas no lineales para determinar la relación entre la velocidad del rotor, la capacitancia, la carga eléctrica alimentada, así como el voltaje y frecuencia generada. Además se proponen estrategias para obtener una regulación de voltaje y frecuencia apropiada para el suministro de energía eléctrica a cargas eléctricas de tipo doméstico. El sistema de generación se implementó con dos motores de inducción trifásicos de 3 HP a 220 V con rotor jaula de ardilla, un variador de velocidad, un banco trifásico de capacitores de 210 μF por fase y un analizador de la calidad de energía FLUKE 434 para la medición de los parámetros eléctricos.

Este esquema puede emplearse en fuentes renovables de energía aisladas de la red eléctrica.

Objetivo

Determinar el comportamiento dinámico del generador auto-excitado con cargas lineales y no lineales.

Objetivos específicos

- Revisión bibliográfica del estado del arte del generador de inducción auto-excitado en aplicaciones de generación de energía eléctrica distribuida.
- Construir e instalar el banco de pruebas (Banco trifásico de capacitores, variador de velocidad, sistema de acoplamiento, entre otros) del generador de inducción auto-excitado.
- Implementar un esquema de generación de energía eléctrica empleando un generador de inducción auto-excitado a partir de un motor convencional con el objetivo de reducir costos de inversión.
- Determinar la factibilidad de operar una conexión trifásica a cuatro hilos sin necesidad de un transformador Delta-estrella.
- Determinar las condiciones necesarias (velocidad y capacitancia) para que el generador de inducción auto-excitado opere a una frecuencia de 50 Hz y 120 V por fase.
- Analizar el comportamiento dinámico del generador de inducción auto-excitado con cargas resistivas e inductivas lineales.
- Comparación de la respuesta dinámica del generador de inducción auto-excitado para carga lineal y no lineal de la misma capacidad.

Capítulo I.- Papel del generador de inducción auto-excitado (GIAE) en el escenario energético mundial

1.1 Situación energética actual

En México contamos con una red eléctrica nacional en la cual las centrales generadoras en muchos casos se encuentran alejadas de los puntos de consumo, lo cual ocasiona pérdidas en la transmisión al tener que enviar la energía eléctrica a grandes distancias.

Los costos de la infraestructura necesaria para proveer energía eléctrica a pequeñas poblaciones alejadas de la red eléctrica nacional vuelve poco viable la construcción de está por ello se quedan aisladas de la red eléctrica. Por otra parte más del 50% de la energía eléctrica del país sin tomar en cuenta la zona centro, se produce por medio de la quema de combustibles fósiles [6].

1.2 Sistemas de generación de energía distribuidos

La generación distribuida (GD) es el uso de pequeñas unidades generadoras que son utilizadas en puntos estratégicos donde se requiere su uso. La GD puede ser usada de manera aislada suministrando la demanda local o integrada a una red eléctrica. Las hay de distintos tipos que trabajan con fuentes fósiles o renovables y van desde generadores menores a 1 kW a decenas de MW. Existen diversas razones por la cual es una buena opción la aplicación de la GD, como principal punto la eficiencia ya que frecuentemente la red eléctrica no suele ser la mejor solución al tener que tender líneas de transmisión a enormes distancias para proveer la energía eléctrica aparte de la caída de voltaje que esto involucra.

La tecnología de GD que incluye motores, pequeñas turbinas de viento, celdas de combustible y celdas fotovoltaicas a pesar de su pequeño tamaño, estas tecnologías de GD están teniendo impactos en el mercado energético cada vez mas fuertes. En algunos mercados la GD está actualmente remplazando la red eléctrica que es más costosa. De cualquier manera hay temas técnicos que

merecen atención como los controladores para el uso eficiente de estos equipos ya que aún es una tecnología joven.

Ningún tipo de GD puede representar todo el rango de capacidades y aplicaciones o el alcance de los beneficios y costos asociados con la GD. Algunas de estas tecnologías han sido usadas por muchos años, especialmente motores alternativos y turbinas de gas. Otras como las celdas de combustible y microturbinas son relativamente nuevos desarrollos. Gran parte de la tecnología de GD está ahora comercialmente disponible y parte de ella se espera que sea introducida o sustancialmente mejorada en pocos años [7].

1.3 El generador de inducción y las fuentes renovables de energía

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 a las terminales del estator un banco trifásico de capacitores [8]-[15]. La fuerza electromotriz y las corrientes inducidas en los devanados se incrementarán hasta alcanzar un punto de equilibrio debido a la saturación magnética en la máquina [16].

El magnetismo residual en el rotor establece el voltaje inicial, el cual se incrementa con la corriente del capacitor lo que provoca un incremento continuo del voltaje. Como resultado de esta acción y de la saturación magnética, se establece un voltaje de estado estacionario en las terminales del generador [17].

Algunas de las ventajas del GIAE son, la ausencia de escobillas y de una fuente de corriente directa separada, bajo costo, mejor estabilidad, construcción sencilla, mantenimiento mínimo, robustez y autoprotección (el voltaje se colapsa cuando se produce un corto circuito en sus terminales [17]-[19]. Por otro lado, una pobre regulación de voltaje incluso con velocidad constante ha sido un punto en contra para su aplicación.

Si la velocidad del generador se mantiene constante, entonces el voltaje generado depende solamente del tamaño de los capacitores y de la carga

conectada. El voltaje de la máquina decrece con un incremento de la carga para un valor fijo de capacitancia. Por lo tanto, para regular el voltaje en terminales, la capacitancia debe variar continuamente con la carga.

Pero la variación continua de la capacitancia no es una propuesta simple, ni económica [20].

El GIAE se puede utilizar para aplicaciones de eólica a pequeña escala, mini y microhidráulica, por lo cual presenta una posible solución al ser usado como una fuente descentralizada de energía y libre de emisiones con lo cual tendríamos un uso de este con las fuentes renovables de energía.

Capítulo II.- El generador de inducción auto-excitado (GIAE)

2.1 Pruebas eléctricas al motor

Antes de realizar las pruebas al GIAE debemos asegurarnos de que tanto como el generador como el primo motor, el cual se muestra en la Fig. 2.1 que es un motor de inducción trifásico con rotor jaula de ardilla marca Siemens de 2.23 kW, 208-220 V, 8.5-8.0 A, 4 polos y 1750 rpm el cual se muestra su placa de datos en la Fig. 2.2 se encuentren en condiciones óptimas de operación por lo cual se realizaron las pruebas que se describen a continuación.



Fig. 2.1 Motor de inducción empleado como primo motor.



Fig. 2.2 Placa de datos del primo motor.

2.1.1 Prueba de vacío

En un motor de inducción, la prueba de vacío mide las pérdidas rotacionales del motor y suministra información sobre su corriente de magnetización. El circuito para esta prueba se muestra en la Fig. 2.3. Los wattmetros, un voltímetro y tres amperímetros se conectan al motor de inducción al que se le permite girar libremente. La única carga puesta sobre el motor es su rozamiento propio y el rozamiento con el aire, de modo que la potencia convertida (P_{conv}) es consumida en el motor por las pérdidas mecánicas y el deslizamiento propio del motor es muy pequeño (posiblemente cerca de 0.001 o menos). En la Fig. 2.4 se muestra el circuito equivalente de ese motor. Con este pequeño deslizamiento, la resistencia correspondiente a su potencia convertida $R_2(1 - s)/s$, es mucho mayor que la resistencia correspondiente a las pérdidas en el cobre del rotor R_2 y mucho mayor que la reactancia del rotor X_2 . En este caso, el circuito equivalente se reduce aproximadamente al último de los circuitos mostrados en la Fig. 2.4. Allí, la resistencia de salida está en paralelo con la reactancia de magnetización X_M y la resistencia de pérdidas en el núcleo, R_C .

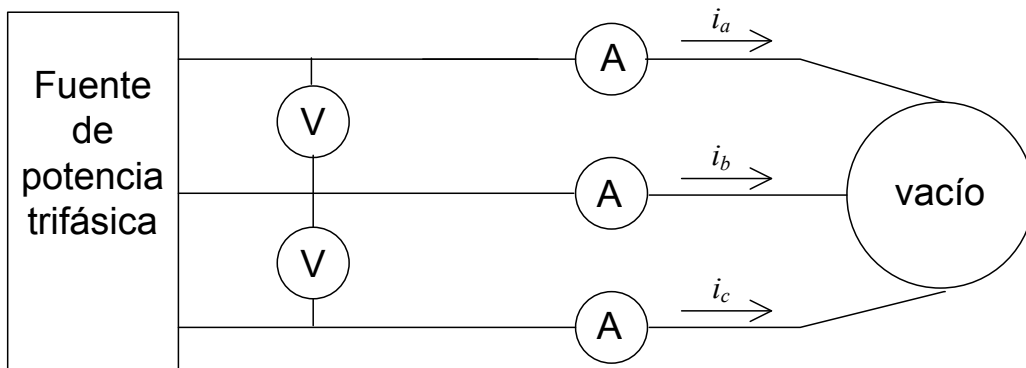


Fig. 2.3 Circuito clásico para la prueba de vacío de un motor de inducción.

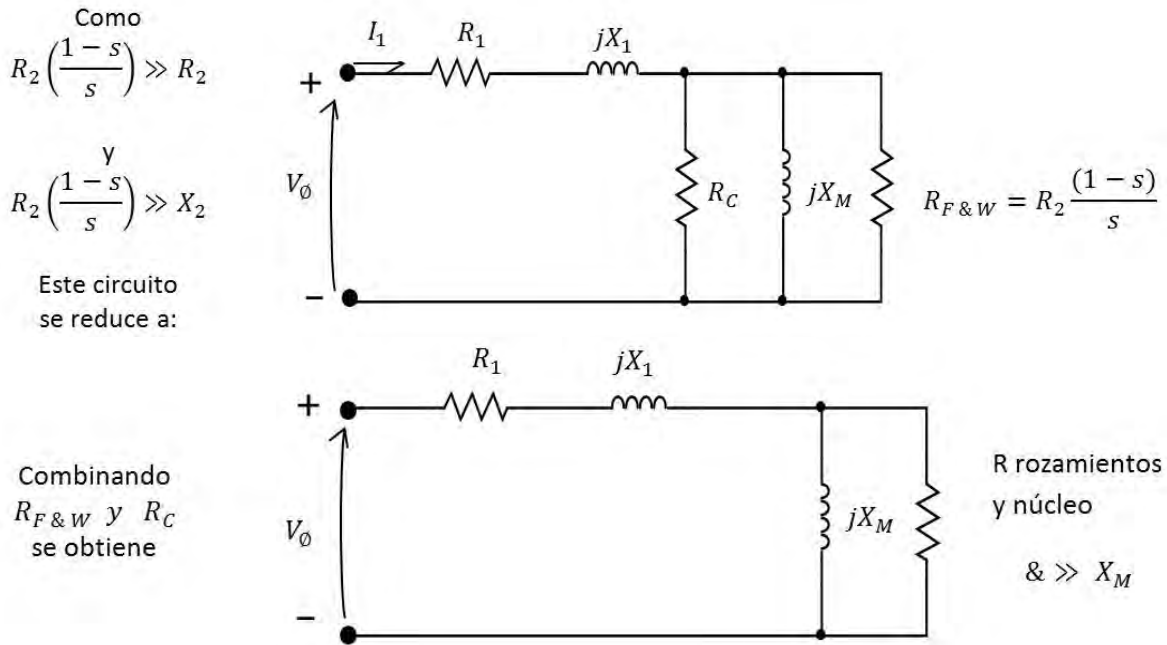


Fig. 2.4 Circuito equivalente para la prueba de vacío de un motor de inducción.

En este motor, en condiciones de vacío, la potencia de entrada medida por los vatímetros debe ser igual a las pérdidas en el motor. Las pérdidas en el cobre del rotor son despreciables debido a que la corriente I_2 es extremadamente pequeña [debido a la gran resistencia de la carga $R_2(1-s)/s$], y por tanto puede ser despreciada. Las pérdidas en el cobre del estator están dadas por

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \quad \text{Ec. 2.1}$$

por consiguiente la potencia debe ser igual a

$$P_{in} = P_{SCL} + P_{núcleo} + P_{F\&W} + P_{misc} = 3I_1^2 R_1 + P_{rot} \quad \text{Ec. 2.2}$$

donde P_{rot} son las pérdidas del motor:

$$P_{rot} = P_{núcleo} + P_{F\&W} + P_{misc} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Entonces, dada la potencia de entrada al motor, se pueden determinar las pérdidas rotacionales de la maquina.

El circuito equivalente que describe la operación del motor en está condición contiene las resistencias R_C y $R_2(1 - s)/s$ en paralelo con la reactancia de magnetización X_M , está reactancia será mucho menor que las resistencias en paralelo con ella, y el factor de potencia total de entrada será muy pequeño. Con esa gran corriente de atraso, la mayoría de la caída de voltaje se producirá a través de los componentes inductivos del circuito. La impedancia de entrada equivalente es entonces aproximadamente

$$|Z_{eq}| = \frac{V_\phi}{I_{1,nl}} \approx X_1 + X_M \quad \text{Ec. 2.4}$$

y si X_1 se puede encontrar, como se explica mas adelante, la impedancia de magnetización X_M será conocida para el motor [21].

En la Fig. 2.5 se muestra una imagen durante la realización de la prueba usando el analizador de calidad de energía para la obtención y captura de los datos y en la Tabla 2.1 se muestran los datos obtenidos de la prueba por calculo y obtenidos desde el variador de frecuencia V1000.



Fig. 2.5 Realización de la prueba de vacío.

Tabla. 2.1 Resultados de la prueba en vacío

	Datos calculados	V1000
I_{prom} (A)	3.53	3.95
V_{L-N} (V)	127.01	127.01
$Z_{vacío}$ (Ω)	35.94	32.15

Como se puede observar los datos obtenidos por medio del cálculo y por medio del variador son semejantes lo que nos da un cierto margen de seguridad del éxito de la prueba.

2.1.2 Prueba corriente directa (CD) para determinar la resistencia del estator

La resistencia del rotor R_2 juega un papel crítico en la operación de un motor de inducción. Entre otras cosas, R_2 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 al motor una prueba estándar, llamada prueba de rotor bloqueado (esta prueba está

detallada en la próxima sección). Sin embargo, esta prueba determina solo la resistencia total. Para encontrar la resistencia aproximada del rotor R_2 , es necesario conocer R_1 de modo que esta se pueda restar del total.

Existe una prueba R_1 independiente de R_2 , X_1 y X_2 , la cual se denomina prueba CD. Básicamente, se aplica un voltaje CD a los devanados del estator en el motor de inducción. Puesto que la corriente es CD, no hay voltaje inducido en el circuito del rotor y en este no fluye corriente resultante. Así mismo, la reactancia a corriente directa es cero. Entonces, la única cantidad que limita el flujo de corriente en el motor es la resistencia del estator, y por tanto, esta puede ser determinada.

El circuito básico para la prueba aparece en la Fig. 2.6, en la cual se muestra una fuente de potencia conectada a dos de las tres terminales del motor de inducción conectado en Y. Para realizar la prueba, se ajusta la corriente del estator al valor nominal y se mide el voltaje en las terminales. La corriente en los devanados del estator 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).

En la Fig. 2.6, la corriente fluye a través de dos de los devanados, de modo que la resistencia total en el camino de la corriente es de $2R_1$. Entonces,

$$2R_1 = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \quad \text{ó} \quad R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \quad \text{Ec. 2.5}$$

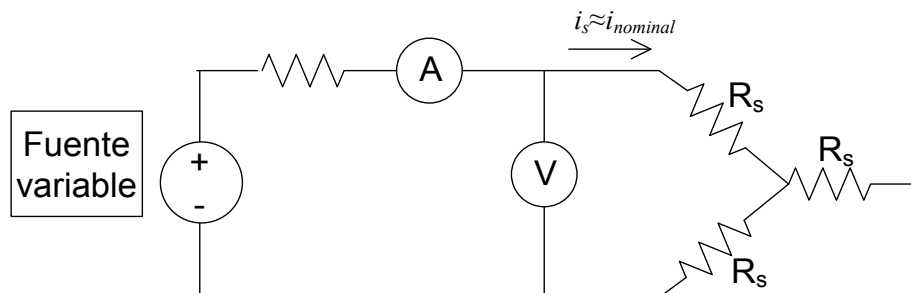


Fig. 2.6 Circuito para la prueba CD.

Conociendo este valor de R_1 se pueden determinar las pérdidas en el cobre del estator en vacío; las pérdidas rotacionales se pueden deducir de la diferencia entre la potencia de entrada en vacío y las pérdidas en el cobre del estator.

El valor de R_1 calculado de esta forma no es muy preciso puesto que se desprecia el efecto pelicular que ocurre cuando se aplica voltaje CA (Corriente Alterna) a los devanados. En la norma 112 de la IEEE (Procedimiento estándar de pruebas de motores y generadores de inducción polifásicos) se encuentran más detalles relacionados con la corrección por temperatura y efecto pelicular [21].

Para la realización de esta prueba se requirió el uso de medidores analógicos del equipo de prueba de motores Feedback el cual se conectó como se muestra en la Fig. 2.7, la prueba se realizó de forma normal para dos fases y como dato adicional para una fase en común con el neutro, los datos obtenidos de la prueba se muestran en la Tabla 2.2.



Fig. 2.7 Imagen de las conexiones y mediciones durante la prueba CD.

Durante la prueba de CD se tomaron imágenes termográficas mostrando en la Fig. 2.7 la temperatura en la carcasa del motor y en la Fig. 2.8 la temperatura de los conectores. Es de suma importancia al realizar la prueba se verifique que el incremento de la temperatura no dañe el motor.

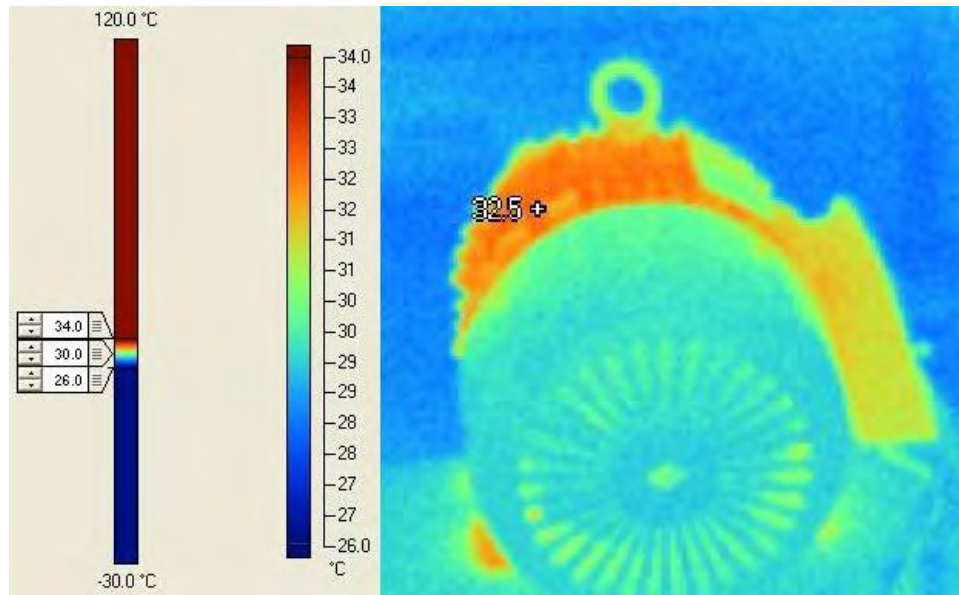


Fig. 2.8 Imagen termográfica del primo motor durante la prueba de CD

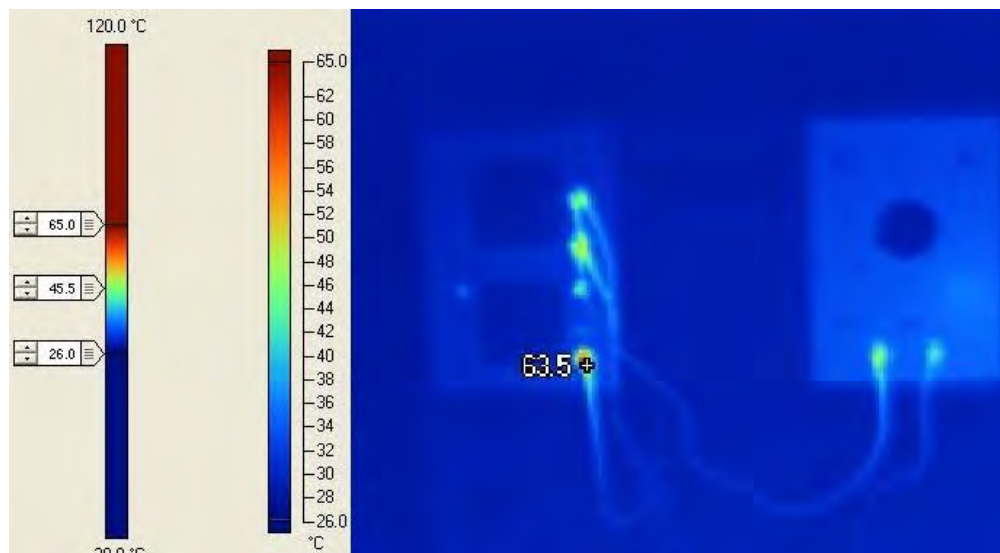


Fig. 2.9 Imagen termográfica de las conexiones del primo motor al sistema de pruebas Feedback durante la prueba de CD

Tabla 2.2 Resultados de la prueba de CD entre dos fases y una fase con el común de la estrella.

	Voltaje (V)	Corriente (A)	Rs (Ω)
2 Fases	10	8	0.625
Fase y común Y	5	8	0.3125

2.1.3 Prueba de rotor bloqueado

La tercera prueba que se puede realizar en un motor de inducción para determinar los parámetros de circuito se llama prueba de rotor bloqueado o algunas veces prueba de motor enclavado. Durante esta prueba que corresponde a la de cortocircuito del transformador, se bloquea o enclava el rotor de forma que no se pueda mover, se aplica voltaje al motor y se miden el voltaje, la corriente y la potencia resultantes.

Para esta prueba se construyó un sistema de bloqueo el cual se realizó de una manera simple a partir de del soldado de varillas a un clutch de motocicleta y realizando el frenado a través del dispositivo por fuerza humana.

La Fig. 2.10 muestra las conexiones para realizar la prueba de rotor bloqueado. Para llevar a cabo la prueba de rotor bloqueado, se aplica un voltaje en el estator y se ajusta el flujo de corriente al valor aproximado de la carga nominal, se miden el voltaje, la corriente y la potencia que fluyen hacia el motor.

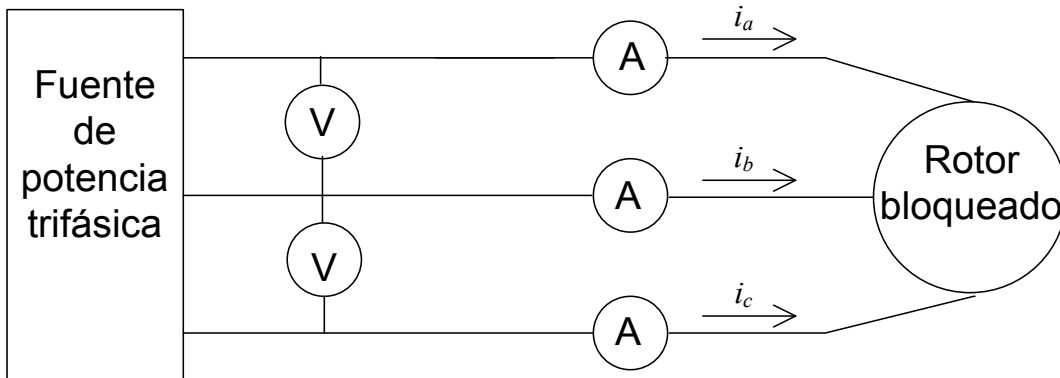
En la Fig. 2.11 se muestra el circuito equivalente para esta prueba. Nótese que como el rotor se encuentra quieto, el deslizamiento es $s=1$, la resistencia del rotor $R_2 I_s$ es justamente igual a R_2 (un valor muy pequeño). Puesto que R_2 y X_2 son tan pequeños, casi toda la corriente de entrada fluirá a través de ellas

en lugar de hacerlo a través de la reactancia de magnetización X_M que es mucho mayor. En estas condiciones, el circuito parece la combinación de la serie de X_1, R_1, X_2 y R_2 .

Sin embargo, esta prueba presenta un problema. En operación normal, la frecuencia del estator es la frecuencia de la línea del sistema de potencia (50 o 60 Hz). En condiciones de arranque, el rotor también está a la frecuencia de línea. Sin embargo, en condiciones de operación normal, el deslizamiento de la mayoría de los motores es tan solo de 2 o 4 % y la frecuencia resultante en el rotor está en un rango de 1 a 3 Hz, lo cual crea un problema en cuanto que la frecuencia de línea no presenta las condiciones de operación normal del rotor. Puesto que la resistencia efectiva del rotor es una función de la frecuencia para motores de diseño clase B y C, la frecuencia incorrecta del rotor puede llevar a obtener resultados falsos en la prueba. En una situación típica se utiliza una frecuencia de 25% o menos de la frecuencia nominal. Aunque esta aproximación es aceptable para rotores de resistencia constante (diseños clase A y D), no es aplicable cuando se trata de encontrar la resistencia normal de rotor en un rotor de resistencia variable. Debido a esto y otros problemas similares, se debe tener mucho cuidado al realizar las mediciones durante estas pruebas.

Después que se han fijado el voltaje y la frecuencia para las pruebas, el flujo de corriente en motor se ajusta con rapidez cerca del valor nominal y se miden la potencia, el voltaje y la corriente de entrada, antes que el rotor se caliente demasiado. La potencia de entrada al motor está dada por

$$P = \sqrt{3}V_T I_L \cos\theta \qquad \text{Ec. 2.6}$$



$$f_r = f_e = f_{test}$$

$$I_L = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} = I_L$$

Fig. 2.10 Circuito de prueba para un rotor bloqueado de inducción.

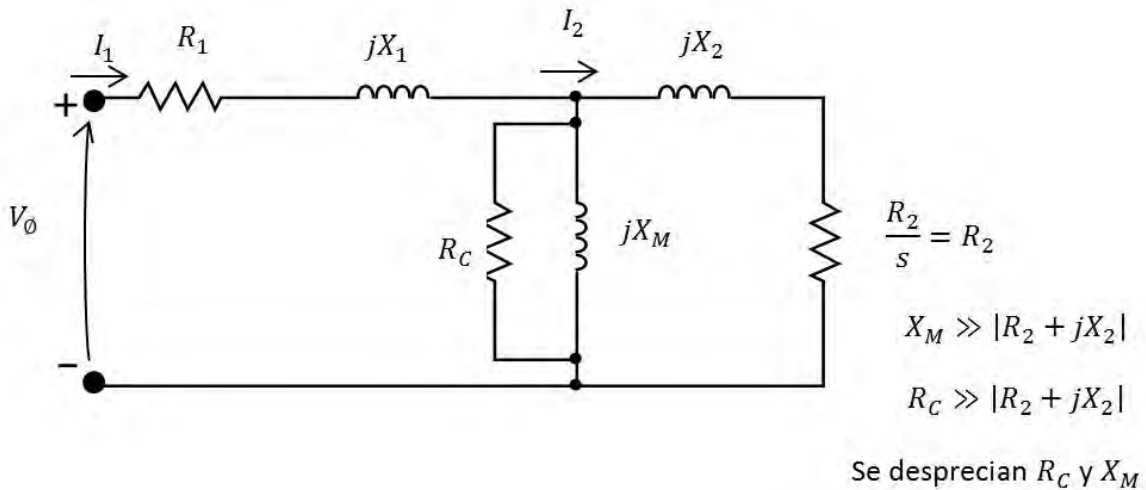


Fig. 2.11 Circuito equivalente para un rotor bloqueado de inducción.

el factor de potencia de rotor bloqueado se puede encontrar como

$$PF = \cos\theta = \frac{P_{in}}{\sqrt{3}V_T I_L} \quad \text{Ec. 2.7}$$

y el ángulo de impedancia θ es justamente igual al coseno inverso de FP (Factor de Potencia).

La magnitud de la impedancia total en el circuito del motor es

$$|Z_{LR}| = \frac{V_{\phi}}{I_1} = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_L} \quad \text{Ec. 2.8}$$

y el ángulo de la impedancia total es θ . En consecuencia,

$$Z_{LR} = R_{LR} + jX'_{LR} = |Z_{LR}|\cos\theta + j|Z_{LR}|\sen\theta \quad \text{Ec. 2.9}$$

la resistencia del rotor bloqueado R_{LR} es igual a

$$R_{LR} = R_1 + R_2 \quad \text{Ec. 2.10}$$

mientras que la reactancia de rotor bloqueado X'_{LR} es igual a

$$X'_{LR} = X'_1 + X'_2 \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde X'_1 y X'_2 son las reactancias del estator y del rotor a la frecuencia de prueba respectivamente.

La resistencia del rotor R_2 se puede encontrar a partir de

$$R_2 = R_{LR} - R_1 \quad \text{Ec. 2.12}$$

Donde R_1 se determinó en la prueba CD. La reactancia total del rotor referida al estator también se puede encontrar. Puesto que la reactancia es directamente

proporcional a la frecuencia de la reactancia equivalente total a la frecuencia de operación normal se puede encontrar como

$$X_{LR} = \frac{f_{nominal}}{f_{test}} X'_{LR} = X_1 + X_2 \quad \text{Ec. 2.13}$$

Desafortunadamente, no hay un a forma sencilla de separar las contribuciones de las reactancias reciprocas del rotor y estator. Durante años, la experiencia ha demostrado que las reactancias del rotor y del estator son proporcionales en motores de ciertos tipos de diseño. La Tabla 2.3 muestra está experiencia. En la práctica diaria, no hay problema real al analizar X_{LR} puesto que la reactancia es la suma de $X_1 + X_2$ en todas las ecuaciones del par.

Tabla 2.3 “Reglas prácticas” para dividir las reactancias del circuito del reactor y del estator.

	X₁ y X₂ como fuentes de X_{LR}	
Diseño del rotor	X₁	X₂
Rotor devanado	0.5 X _{LR}	0.5 X _{LR}
Diseño A	0.5 X _{LR}	0.5 X _{LR}
Diseño B	0.4 X _{LR}	0.6 X _{LR}
Diseño C	0.3 X _{LR}	0.7 X _{LR}
Diseño D	0.5 X _{LR}	0.5 X _{LR}

En la Fig. 2.12 se muestra una imagen durante la prueba de rotor bloqueado aplicando el mecanismo de bloqueo por fuerza humana a través del

mecanismo con freno de clutch acondicionado mostrado en la Fig. 2.13. Además en la Tabla 2.4 se muestran los resultados de la prueba.



Fig. 2.12 Imagen durante la prueba de rotor bloqueado.



Fig. 2.13 Dispositivo de frenado a base de Clutch de motocicleta

Tabla 2.4 Resultados de la prueba de rotor bloqueado.

	Datos calculados
I_{prom} (A)	8.533333333
Z_{locked}(Ω)	14.8
V_{∞} (V)	69
X_{LR}(Ω)	13.81
R_{LR}(Ω)	5.3

2.2 Construcción y ensamble del banco de capacitores

La potencia reactiva requerida para establecer el campo magnético en el entrehierro del generador es proporcionado por un banco de capacitores con una capacitancia total por fase de 210 μ F. La capacitancia puede seleccionarse con tres derivaciones, cada una de 70 μ F. La selección de la derivación correspondiente se realiza mediante la conexión de tres contactores trifásicos. Se realizó un banco de capacitores de tres arreglos trifásicos en estrella colocados en paralelo, cada uno con su interruptor de riel y un relevador de sobrecarga contando con interruptor principal para el banco de capacitores. El banco se montó en una placa de acero galvanizado. Todos los capacitores utilizados son de la misma marca y capacitancia, y estos cuentan con un resistor que disipa el potencial en forma de calor para descargarla como dispositivo de seguridad. Se utilizaron conectores aislados en las terminales y el cable que sale de los capacitores hacia los relevadores, el cual es de aislante para alta temperatura. El banco se muestra completo en la Fig. 2.14. La placa galvanizada, capacitores, parte del cableado y diversos elementos de este banco de capacitores fueron obtenidos de un banco de capacitores industrial donado a la UQROO por la CFE, debido a que este no se encontraba en condiciones de operación fue desmontado y aprovechado estos materiales que contenía su interior.

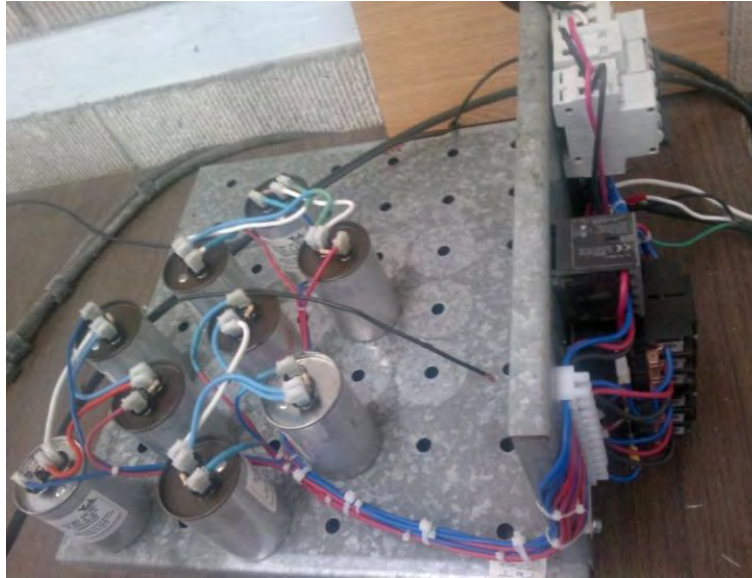


Fig.2.14 Banco trifásico de capacitores de 210 μ F por fase.

2.3 Instalación y manejo del variador de frecuencia

Este dispositivo fue indispensable para una gran cantidad de pruebas debido a que nos permitió variar la velocidad y frecuencia de arranque así como la operación del primo motor con lo cual se encontraron muchos datos de las variables requeridas para la elaboración de este proyecto. Por seguridad y facilidad de uso, se montó el variador de velocidad marca Yaskawa modelo v1000 en el modulo de motores Feedback, para ello se utilizo la placa de un modulo que se encontraba estaba en condiciones inoperables e irreparables. En la Fig. 2.15 se muestra una imagen del variador de velocidad y el montaje de este en el modulo Feedback.



Fig.2.15 Variador de frecuencia V1000 y montaje del mismo en el módulo de motores Feedback.

2.4 Sistema de acoplamiento de los motores

Para realizar el acoplamiento de los motores, dado a que el primo motor y el generador usados son del mismo modelo, únicamente fue necesario colocarlos sobre una base plana nivelada perpendicular al suelo y construir acopladores con uña y prisionero que se fijaran al eje como se muestra en la Fig. 2.16y una pieza plástica que se muestra en la Fig. 2.17que une los dos acopladores y amortigua en caso de un movimiento irregular para no afectar el eje del rotor. Estos se fijaron a la base para evitar que algún movimiento accidental durante las pruebas pueda ocasionar un mal acoplamiento. Con ello se logró hacer un acoplamiento con una baja vibración similar a lo ideal que sería fijar los motores en un riel para pruebas. El acoplamiento del generador y el primo motor se muestra en la Fig. 2.18.



Fig. 2.16 Motor con acoplador fijado al eje del rotor.



Fig. 2.17 Pieza plástica amortiguadora para el sistema de acoplamiento de motores.



Fig. 2.18 Acoplamiento del generador y primo motor.

2.5 Equipos de medición

Se utilizaron los siguientes equipos de medición para la realización de este proyecto, de forma prioritaria se utilizó el analizador de calidad de energía FLUKE 434 mostrado en la Fig. 2.19. Este equipo mide y captura datos tales como voltaje y corriente por fase y retorno, diagramas fasoriales, distorsión armónica, potencia, energía, F.P., por mencionar algunas de sus características relevantes. De igual forma se utilizó un tacómetro digital mostrado en la Fig. 2.20 para obtener las lecturas de velocidad angular del motor y generador en las pruebas.



Fig. 2.19 Analizador de la calidad de energía FLUKE 434



Fig. 2.20 Tacómetro digital

2.6 Sistema completo del generador de inducción auto-excitado

El sistema completo del GIAE que se muestra en la Fig. 2.21 comprende del variador v1000 que se encuentra conectado a la fuente, este conectado al primo motor que está acoplado al generador cuyas terminales de salida se conectaron en paralelo entre el banco de capacitores y la carga



Fig. 2.21 Banco de pruebas del GIAE

Capítulo III.- Análisis de comportamiento dinámico bajo diferentes condiciones de operación.

El procedimiento general al realizar las pruebas se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. Energizar al primo motor.
2. Asignarle un valor de frecuencia de 55 Hz al variador como un estándar de inicio.
3. Conexión del interruptor principal del banco de capacitores.
4. Conexión del interruptor de uno de los arreglos del banco de capacitores.
5. Conexión del interruptor de la carga
6. Conectar la carga de manera segmentada ajustando el variador hasta obtener condiciones deseables de 120 V y 50 Hz.
7. En caso de no ser suficiente con uno de los arreglos del banco de capacitores conectar otro interruptor.
8. Repetir los pasos 6 y 7 hasta lograr las condiciones ideales.

En las pruebas puede observarse que la frecuencia es menor a los 60Hz que es la frecuencia empleada en México. Esto se debe al hecho que para lograr esta frecuencia tendríamos que lograr que el primo motor superara la frecuencia de 60 Hz lo cual no es posible debido a que el variador limita la frecuencia a la cual se puede someter el motor ya que está diseñado para operar hasta el límite en que el equipo conectado trabaje de manera óptima, entonces al no poder lograr una frecuencia mayor en el primo motor, se tomo la decisión de manejar una frecuencia de 50 Hz con la finalidad de demostrar la pertinencia del estudio; además que es una frecuencia utilizada en otras redes eléctricas (Europa, Japon).

3.1 Prueba de vacío

Para lograr los siguientes resultados se ajustó el variador a una frecuencia de 50 Hz y la medición con el tacómetro digital fue de 1496 rpm.

En la Fig. 3.1 se observa una presencia importante de armónicos de voltaje en las ondas sinusoidales formadas por las lecturas, lo que posiblemente indica que las corrientes en el entrehierro no son despreciables, incluso en vacío.

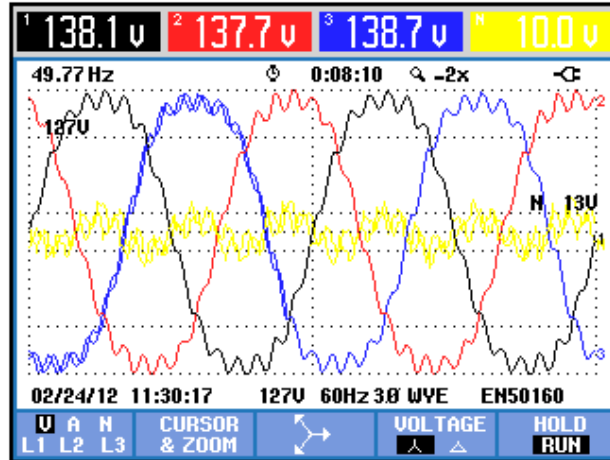


Fig. 3.1 Voltajes en las tres fases y neutro en la prueba de vacío.

En las Fig. 3.2 y Fig. 3.3 se muestra la corriente y potencia de salida nula que corrobora la validez de la prueba de vacío.

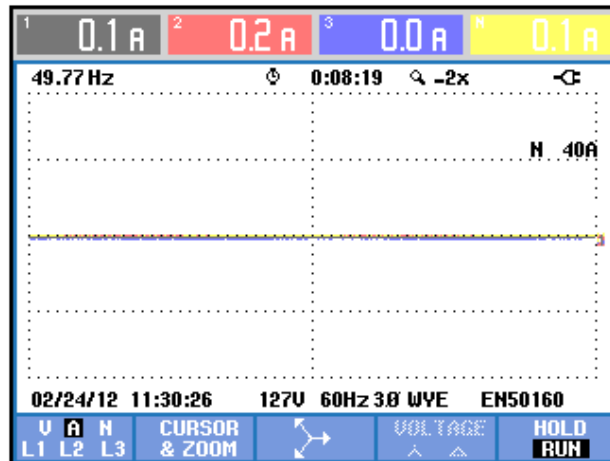


Fig. 3.2 Corrientes en las tres fases y neutro en la prueba de vacío.



Fig. 3.3 Potencia generada en la prueba de vacío.

La Fig. 3.4 muestra el espectro en frecuencia de los voltajes de fase que corrobora la presencia de armónicos que son los causantes de la deformación de la onda sinusoidal.

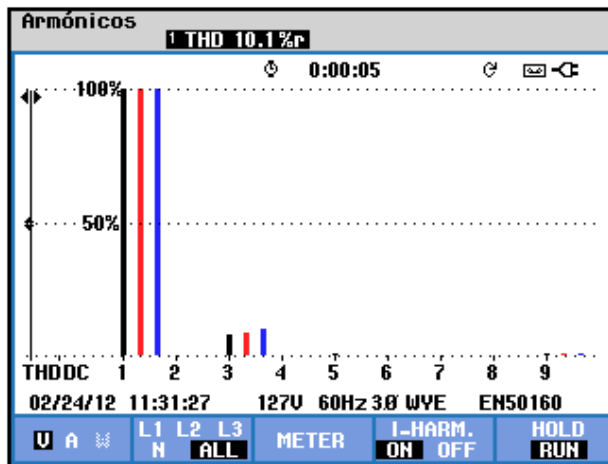


Fig. 3.4 Armónicos en la prueba de vacío.

Durante la prueba de vacío se realizó una toma termográfica al primo motor y al generador mostrados en la Fig 3.4 y se pudo observar que el generador se encontraba más caliente que el primo motor al contrario de lo que se esperaría cuando aparentemente el esfuerzo mecánico de hacer rotar el eje del generador debería producir un mayor esfuerzo y temperatura al primo motor por tanto

para futuros trabajos se recomienda un extenso análisis termográfico para conocer más a detalle y poder optimizar este fenómeno.

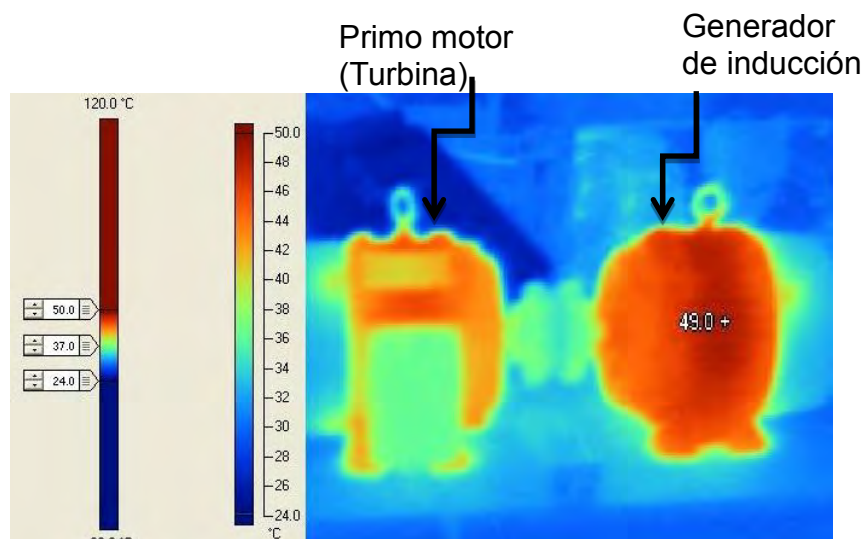


Fig. 3.5 Imagen termográfica durante la prueba de vacío

3.2 Prueba de carga resistiva lineal

Para logreste caso de estudio se ajustó el variador a una frecuencia de 52.3 Hz. Se colocó una carga resistiva de 500W por fase a traves de lámparas incandescentes y la medición con el tacómetro digital fue de 1531 rpm.

En las Fig. 3.5 y 3.6 se observa que las tesiones generadas y las corrientes de cargason cercanas a 120V y 50Hz en cada fase lo demuestra el equilibrio deseado entre fases.

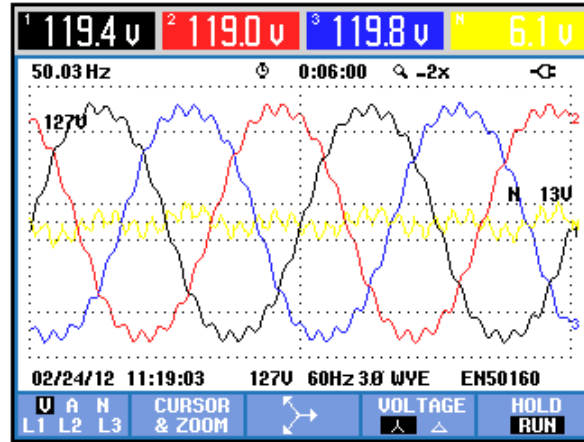


Fig. 3.5 Voltajes en las tres fases y neutro en la prueba de carga resistiva lineal.

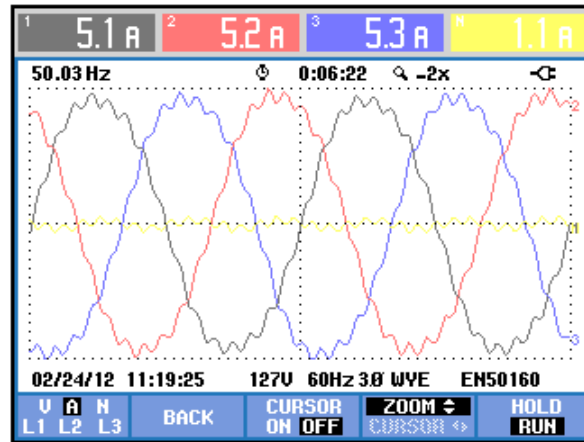


Fig. 3.6 Corrientes en las tres fases y neutro en la prueba de carga resistiva lineal.

En la Fig. 3.7 y Fig. 3.8 se observa que las señales de corriente y voltaje muestran un desfase mínimo, lo que nos permite considerar un F.P. de cercano a 1 con carga puramente resistiva, esto sucede de igual manera para todas las fases ya que se encuentran balanceadas lo que se demuestra con la Fig. 3.9.

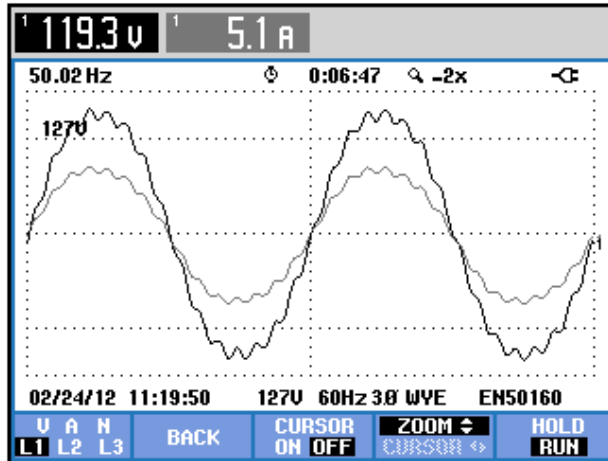


Fig. 3.7 Voltajes y corriente de la fase uno en la prueba de carga resistiva lineal.

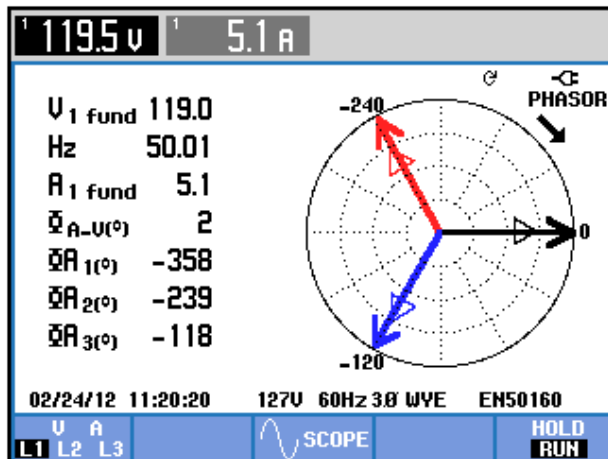


Fig. 3.8 Diagrama fasorial de la prueba de carga resistiva lineal.

Potencia y energía				
	FUND			
	L1	L2	L3	Total
kW	0.61	0.62	0.63	1.85
kVA	0.61	0.62	0.63	1.85
kVAR	÷ 0.02	0.01	0.02	0.05
PF	1.00	1.00	1.00	1.00
Cosφ	1.00	1.00	1.00	
A rms	5.1	5.2	5.3	
	L1	L2	L3	
V rms	119.3	118.9	119.7	

02/24/12 11:20:48 127V 60Hz 3Ø WYE EN50160

VOLTAGE ENERGY TREND HOLD RUN

Fig. 3.9 Potencia generada en la prueba de carga resistiva lineal.

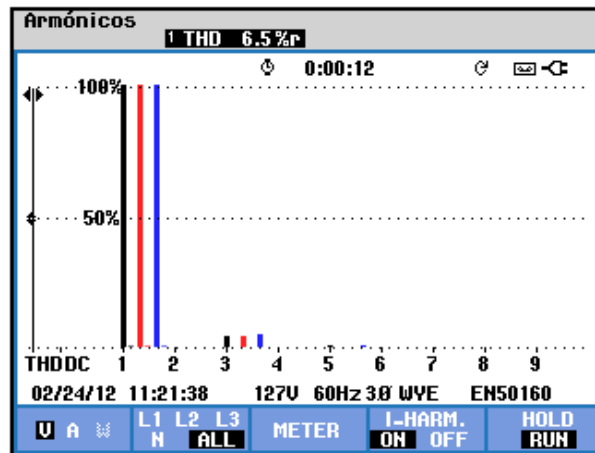


Fig. 3.10 Armónicos en la prueba de carga resistiva lineal.

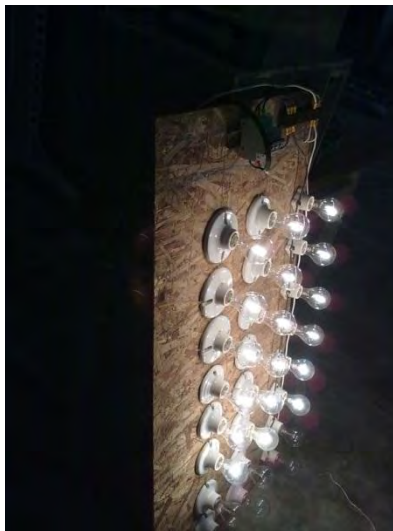


Fig. 3.11 Carga puramente resistiva a base de lámparas incandescentes usada para la prueba de carga resistiva lineal.

3.3 Prueba de carga inductiva lineal

Para esta prueba se utilizó como carga inductiva tres extractores de aire de potencia similar, y la prueba se realizó a 50.5 Hz y 1506 rpm. En la Fig. 3.12 se puede observar un desbalance entre las tensiones mostrando que la tensión es menor en la fase tres que en la fase uno y dos lo cual nos indica que la carga no es la misma para las tres fases.

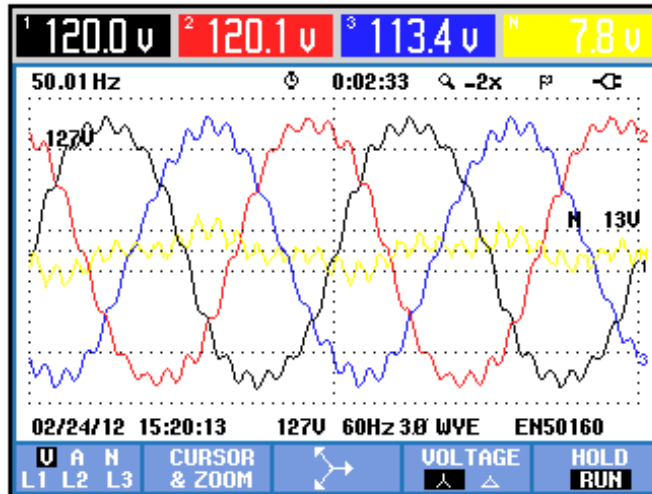


Fig. 3.12 Voltajes en las tres fases y neutro de la prueba de carga inductiva lineal.

Una vez observado el desbalance entre las tensiones mostrado en la Fig. 3.12 podemos esperar un desbalance similar entre las corrientes y esto se verifica con la Fig. 3.13. Al tener una potencia mayor conectada en la tercera fase, ésta consume un mayor número de reactivos del banco de capacitores, lo cual además de causar desbalance provoca un menor F.P.

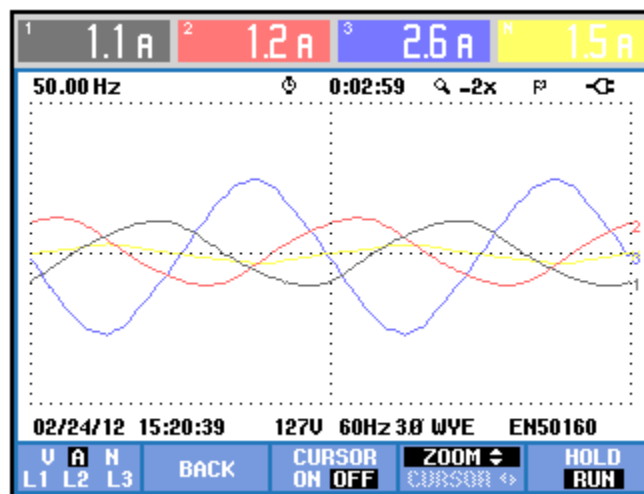


Fig. 3.13 Corrientes en las tres fases y neutro de la prueba de carga inductiva lineal.

En la Fig. 3.16 se observa la diferencia de forma de onda entre el voltaje y la corriente de la fase tres en comparación a las dos primeras mostradas en la Fig. 3.14 y Fig. 3.15.

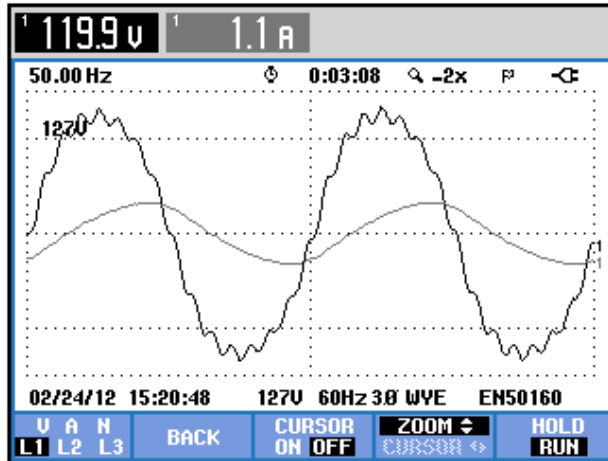


Fig. 3.14 Corriente y voltaje en la fase uno de la prueba inductiva lineal.

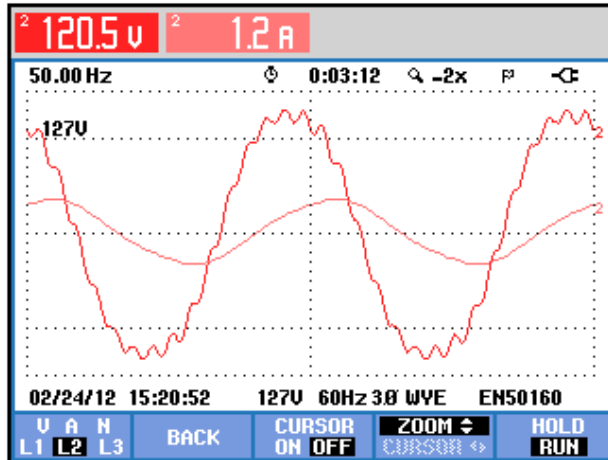


Fig. 3.15 Corriente y voltaje en la fase dos de la prueba inductiva lineal.

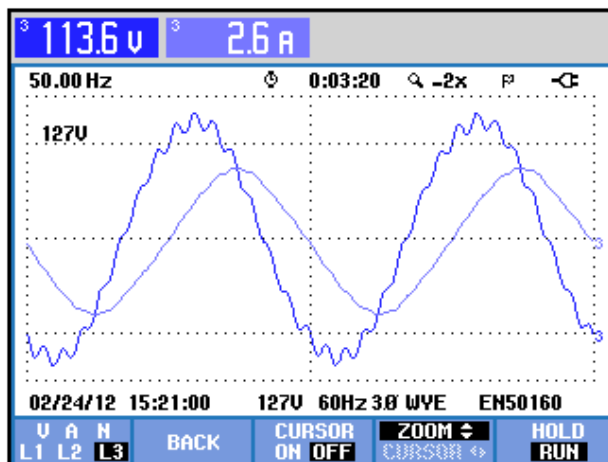


Fig. 3.16 Corriente y voltaje en la fase tres de la prueba inductiva lineal.

En la Fig. 3.19 se observa que el desfase de la fase tres es ligeramente mayor al de las fases uno y dos mostradas en la Fig. 3.17 y Fig. 3.18.

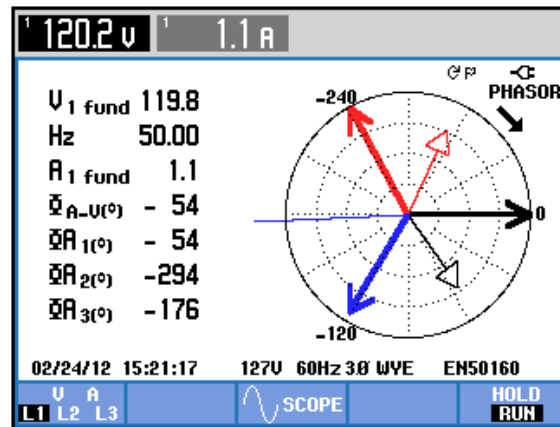


Fig. 3.17 Diagrama fasorial de la fase uno en la prueba inductiva lineal.

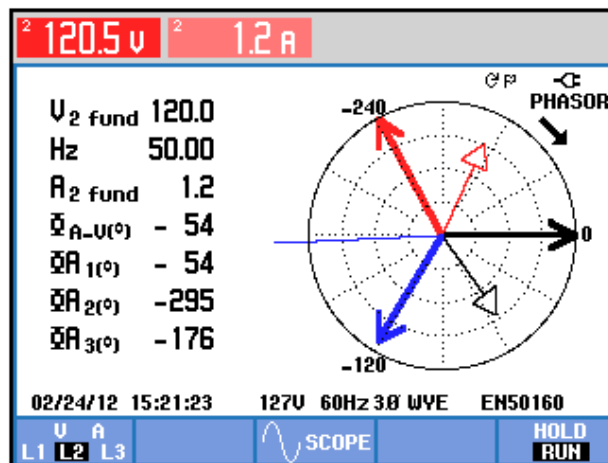


Fig. 3.18 Diagrama fasorial de la segunda fase en la prueba inductiva lineal.

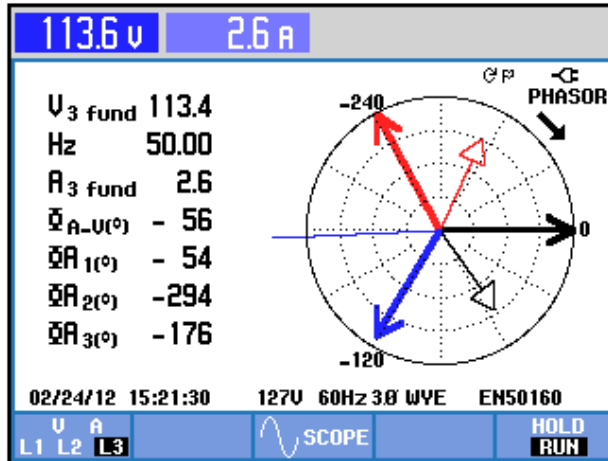


Fig. 3.19 Diagrama fasorial de la tercera fase en la prueba inductiva lineal.

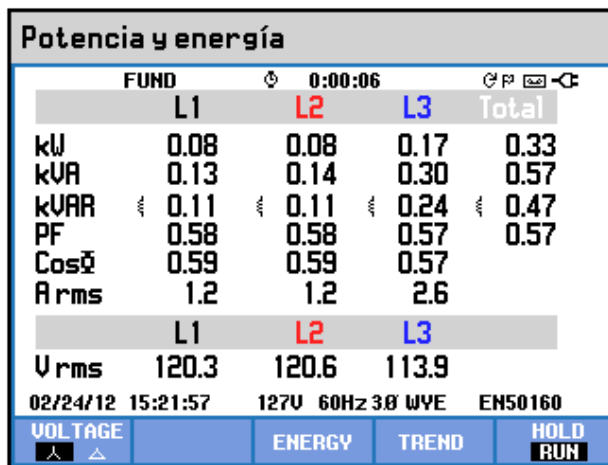


Fig. 3.20 Potencia generada en la prueba inductiva lineal.

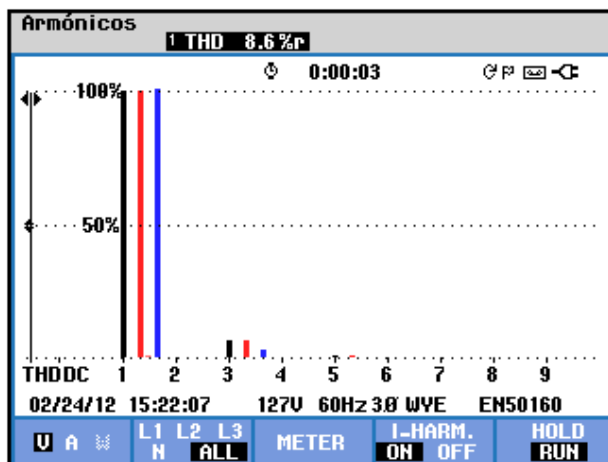


Fig. 3.21 Armónicos en la prueba inductiva lineal.

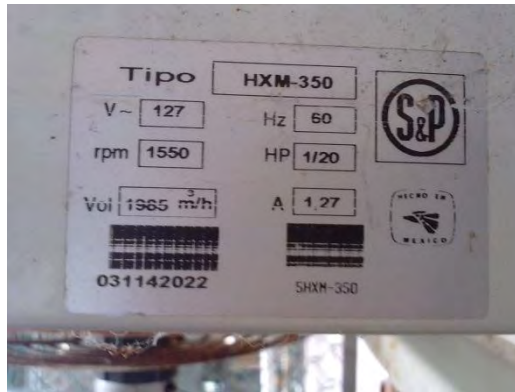


Fig. 3.22 Placa de datos de uno de los extractores utilizados para la prueba de carga inductiva lineal.

3.4 Prueba comparativa carga lineal y no lineal

Se realizaron dos pruebas para comparar los resultados de una carga lineal y una carga no lineal. La serie de imágenes a continuación mostrará esta comparación teniendo a la izquierda la carga lineal que consiste de una lámpara incandescente de 100 W por fase a 50 Hz y 1490 rpm, y a la derecha la carga no lineal conformada por 8 lámparas fluorescentes de 13 W obteniendo 104 W por fase a 50 Hz y 1490 rpm.

En la Fig. 3.23 se observa que el nivel de voltaje generado para una potencia de salida similar en la comparación es menor en la carga no lineal debido a la corriente requerida por los balastos electrónicos, donde la potencia reactiva de la carga se toma del banco de capacitores.

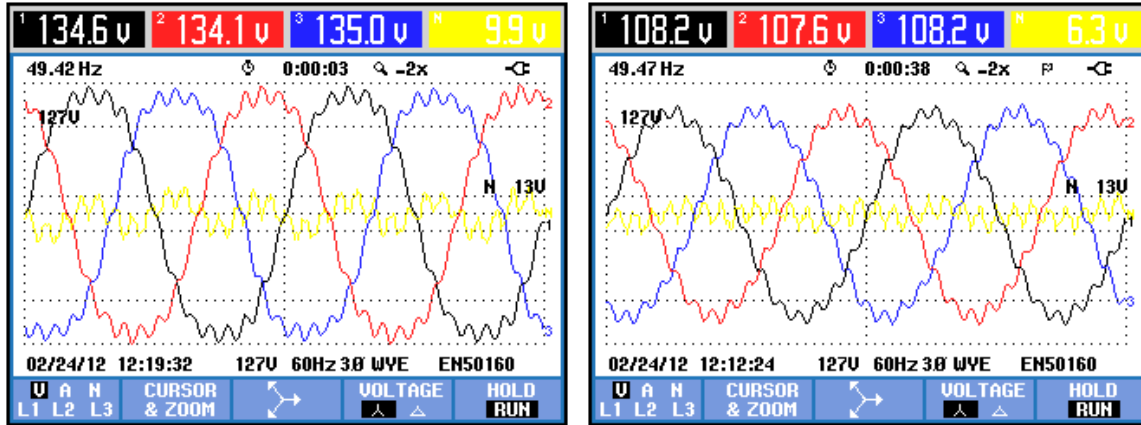


Fig. 3.23 Voltajes de las tres fases y neutro en la prueba comparativa.

En la Fig. 3.24 se observa como la curva sinusoidal típica de corriente se ve afectada debido a la carga no lineal de los balastos electrónicos formada por las lámparas fluorescentes.

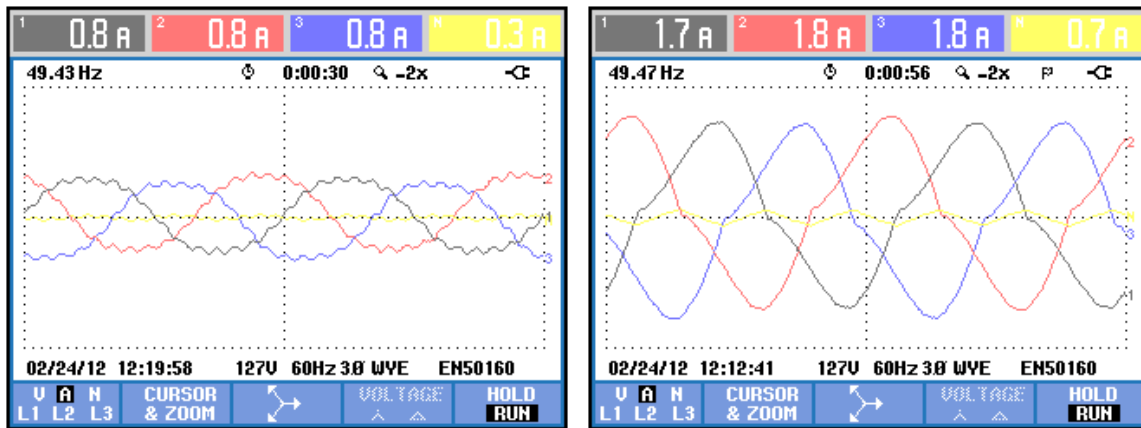


Fig. 3.24 Corrientes de las tres fases y neutro en la prueba comparativa.

En la Fig. 3.25 y Fig. 3.26 se puede observar la diferencia del desfase entre las pruebas, esto se debe a que la potencia reactiva consumida en la prueba no lineal por la carga inductiva conectada causa un desfase el cual no se presenta en la prueba de carga lineal.

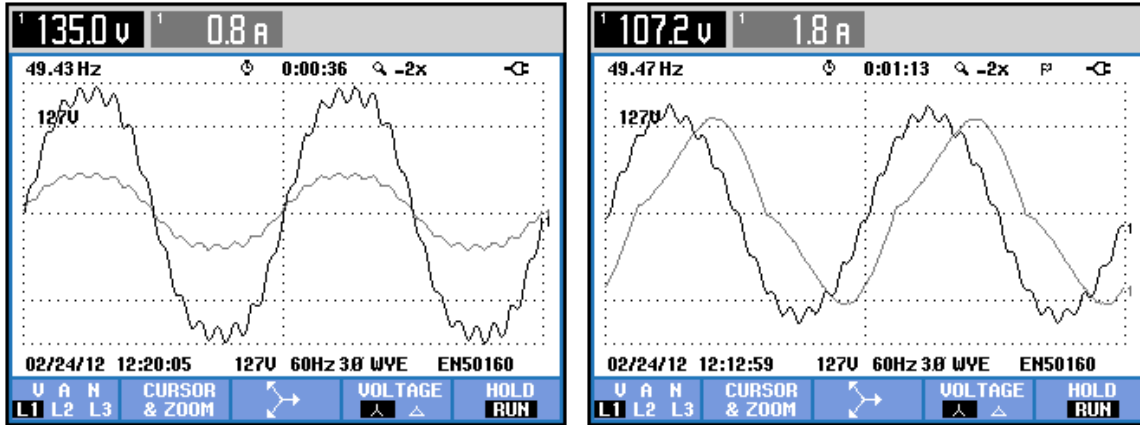


Fig.3.25 Voltaje y corriente de la primera fase en la prueba comparativa.

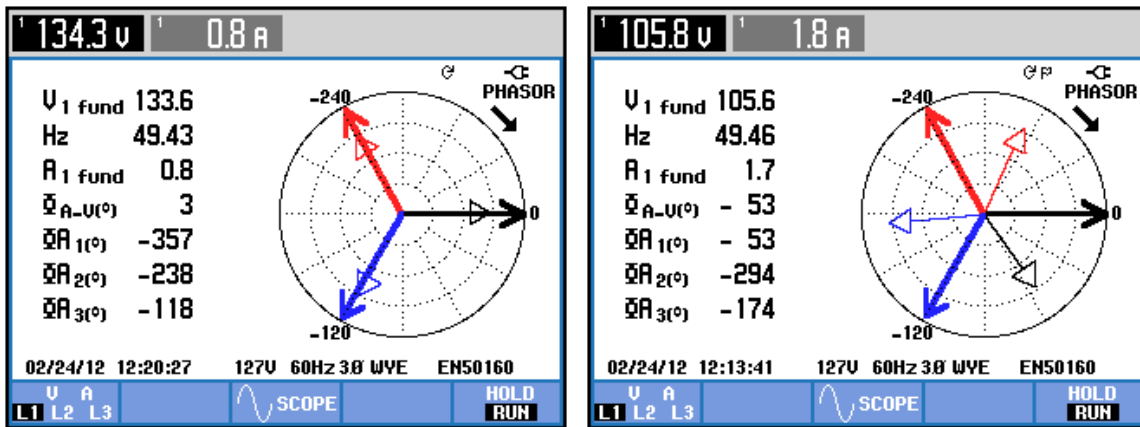


Fig.3.26 Diagrama fasorial en la primera fase de la prueba comparativa.

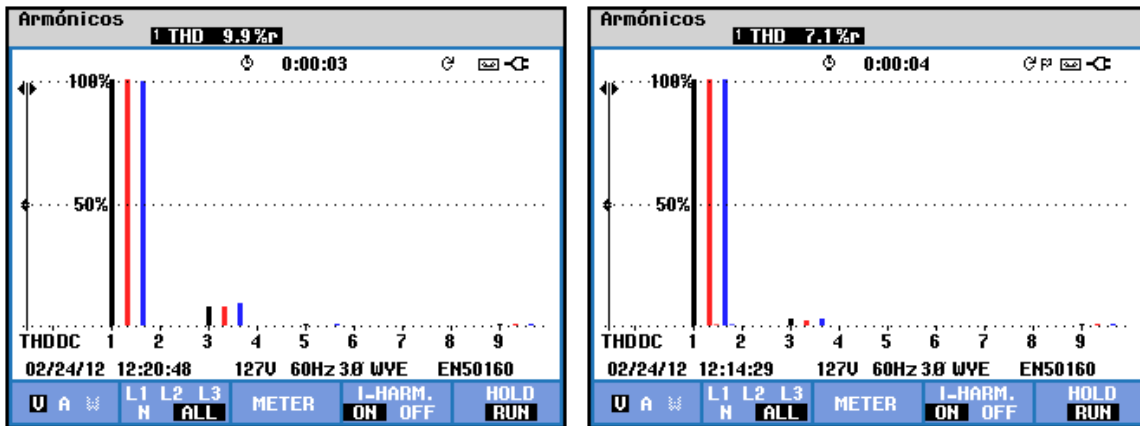


Fig.3.27 Armónicos en la prueba comparativa.

En la Fig. 3.28 se puede observar que aunque la potencia activa consumida durante ambas pruebas es semejante. La potencia aparente y reactiva son distintas debido al consumo de reactivos en la prueba de carga no lineal.

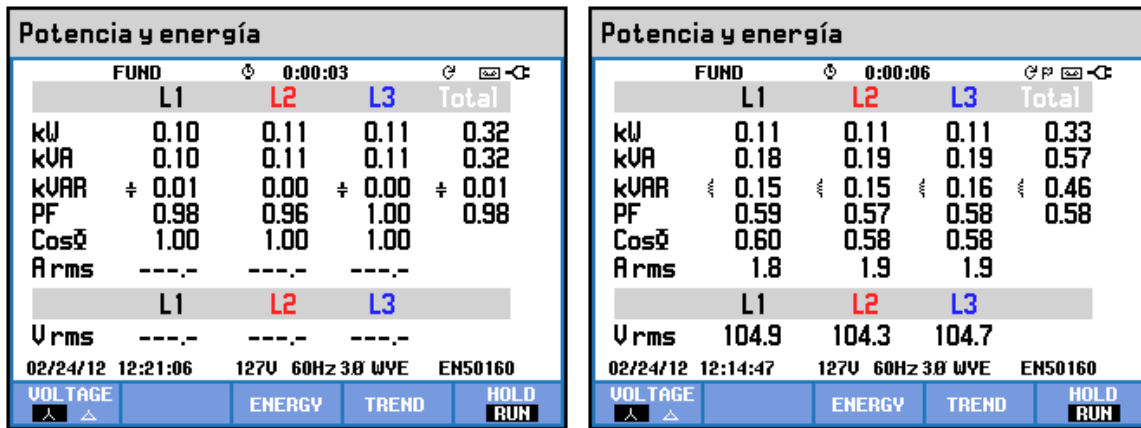


Fig.3.28 Potencia y energía en la prueba comparativa.

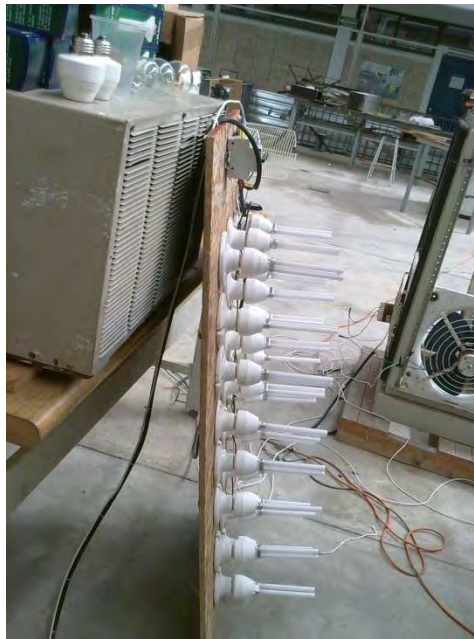


Fig.3.29 Carga no lineal utilizada para la prueba comparativa.

Conclusiones

Se implementó un banco de pruebas del GIAE para generación de energía eléctrica empleando motores de inducción de doble estrella, ya que son más económicos y robustos que los generadores síncronos de la misma capacidad. Además los generadores de inducción presentan una mayor resistencia a las condiciones ambientales, mantenimiento económico y sencillo de realizar, lo cual incrementan su vida útil. La implementación de este sistema trifásico a cuatro hilos se logró sin la necesidad de usar un transformador de escala uno a uno para la obtención de un punto neutro como se realizó en estudios similares previos a este, esto se logro aprovechando el común de la estrella como punto neutro.

El banco de pruebas del GIAE elaborado puede producir una potencia de 1850 W lo cual es suficiente para suministrar energía a viviendas de interés social. Por otra parte la tensión eléctrica está en función de la velocidad suministra el banco de capacitores, el cual estuvo sobredimensionado para está prueba debido a que solo se utilizaron la dos primeras secciones de este. Cuando una carga se conecta a las terminales del generador la magnitud de la tensión eléctrica y de la frecuencia se reduce. Un incremento en la velocidad del primo motor produce un incremento en la tensión y en la frecuencia, sin embargo, un incremento en la capacitancia solo tiene efecto sobre la magnitud de la tensión eléctrica. Esta claro que cuando la carga conectada es lineal, se requiere de una cantidad menor de potencia reactiva o capacitancia comparado con el caso de las cargas inductivas no lineales. Cuando la carga es inductiva y no lineal, se requiere de una potencia reactiva adicional y se tiene un bajo factor de potencia. Para mantener tensión y frecuencia constantes es necesario una regulación de la velocidad del primo motor y de la capacitancia, sin embargo, esto puede ser una solución no tan viable debido ala complejidad de manejar capacitores conmutados por dispositivos electrónicos. Una opción más viable es contar con una velocidad constante de entrada así como un banco de capacitores fijos y emplear una carga en paralelo con el usuario que mantenga la potencia de salida constante, comúnmente denominados Controladores Electrónicos de Carga.

Esta tecnología en conjunto de otras existentes son algunas de las opciones que tenemos para solucionar diferentes escenarios de generación eléctrica, como por ejemplo: el suministro de energía eléctrica a poblados aislados de la red eléctrica, reducir el impacto al medio ambiente o simplemente realizar una inversión a largo plazo debido a que el costo de la energía se incrementa con el tiempo.

Bibliografía

- [1] R. C. Bansal, T. S. Bhatti, and D. P. Kothari, —A bibliographical survey on induction generators for application of nonconventional energy systems,|| IEEE Trans. Energy Convers., vol. 18, no. 3, pp. 433–439, Sep. 2003.
- [2] J. B. Ekanayake, —Induction generators for small hydro schemes,|| Power Eng. J., vol. 16, no. 2, pp. 61–67, Apr. 2002.
- [3] J. M. Elder, J. T. Boys, and J. L. Woodward, —Self-excited induction machine as a low cost generator,|| Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 131, pt. C, no. 2, pp. 33–40, Mar. 1984.
- [4] S. Rajakaruna and N. N. Maw, —Unregulated performance of an induction generator in an isolated micro hydro power plant,|| in Proc. 7th IPEC, Nov. 29–Dec. 2, 2005, pp. 1–6.
- [5] E.D. Basset and F.M. Potter, — “Capacitive excitation of induction generators”||, Trans. of the Amer. Inst. Electr. Eng., Vol. 54, No. 5, pp. 540-545, May 1935.
- [6]<http://www.cfe.gob.mx/QUIENESSOMOS/ESTADISTICAS/Paginas/Indicadoresdegeneraci%C3%B3n.aspx>
- [7] Loi Lei Lai and Tze Fun Chan, “Distributed Generation Induction and Permanent Magnet Generators”, IEEE. 2007, pp. 3–4.
- [8] M.A. Elsharkawi, S.S. Venkata, T. J. Williams, and N.G. Butlar, “An adaptive power factor controller for three-phase induction generators”, IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-104, no.7, pp. 1825-1831, Jul. 1985.
- [9] R. Bonert and G. Hoops, “Stand alone induction generator with terminal impedance controller and no turbine controls,” in Proc. IEEE Power Engineering Soc. Summer Meeting, 1989, pp. 28–31.
- [10] N. Elsonbaty, P. G. Holmes, M. Salama, N. P. A. Smith, and A. A. Williams, “VSCF induction generation in stand-alone micro-hydro generating systems,” in Proc. Renewable Energy Conf., 1993, pp. 89–94.

- [11] S. Rajakaruna and R. Bonert, "A technique for the steady-state analysis of a self-excited induction generator with variable speed", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 8, no. 4, pp. 757–761, Dec. 1993.
- [12] N. P. A. Smith, "Induction generators for stand-alone micro-hydro systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Power Electronics Drive Energy Systems for Industrial Growth*, New Delhi, India, 1996, pp. 669–673.
- [13] A.-R. A. M. Makky and N. A. El-Latif, "Integral-cycle control with a d.c. chopper controller for single-phase induction motor", *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 40, pp. 91–98, 1997.
- [14] F. A. Farret, C. A. Portolann, and R. Q. Machado, "Electronic control by the load for asynchronous turbogenerators, driven by multiple sources of energy," in *Proc. IEEE Conf. Devices, Circuits, Systems*, 1998, pp.332–337.
- [15] D. Henderson, "An advanced electronic load governor for control of micro hydroelectric generation," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 13, no. 3, pp. 300– 304, Sep. 1998.
- [16] R. Bonert and S. Rajakaruna, "Self-excited induction generator with excellent voltage and frequency control," *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Distrib.*, vol. 145, no. 1, pp. 33–39, Jan. 1998.
- [17] S. S. Murthy, R. Jose, and B. Singh, "Experience in the development of microhydel grid independent power generation scheme using induction generators for Indian conditions," in *Proc. IEEE Int. Conf. Global Connectivity Energy, Computer, Communication, Control*, vol. 2, 1998, pp.461–465.
- [18] Bhim Singh, S. S. Murthy, Sushma Gupta, "Analysis and Design of Electronic Load controller for Self-Excited Induction Generators", *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 21, no. 1, March 2006.
- [19] B. Singh, S.S. Murthy, S. Gupta, "Analysis and implementation of an electronic load controller for a self-excited induction generator", *IEE Proc.-Gener. Transm.Distrib.*, Vol. 151, No. 1, January 2004.

[20] R.C. Bansal, “Three phase self excited induction generators: an overview”, IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 20, No. 2, June 2005.

[21] J. Chapman, “Máquinas eléctricas”, Mc Graw Hill, 2000.

Anexos

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN AUTO-EXCITADO CON CARGAS LINEALES Y CARGAS NO-LINEALES.

Emmanuel Torres Montalvo, Freddy Ignacio Chan, Víctor Manuel Sánchez Huerta, Homero Toral Cruz, Joan Alba Aguilar

Universidad de Quintana Roo, División de Ciencias e Ingeniería.

etorres@uqroo.mx, freddy@uqroo.mx, vsanchez@uqroo.mx,
htoral@uqroo.mx, joan.alba.aguilar@gmail.com

Resumen. Este trabajo presenta un análisis con base en datos experimentales sobre el comportamiento dinámico del generador de inducción con cargas resistivas, cargas inductivas y cargas no lineales para determinar la relación entre la velocidad del rotor, la capacitancia, el voltaje y frecuencia generados y la carga eléctrica alimentada. Posteriormente se proponen estrategias para obtener una regulación de voltaje y frecuencia apropiada para el suministro de energía eléctrica a cargas eléctricas de tipo domestico. El sistema de generación se implementó con dos motores de inducción trifásicos de 3 HP a 220 V con rotor jaula de ardilla, un variador de velocidad modelo V1000 , una banco trifásico de capacitores de 210 μ F por fase y un analizador de la calidad de energía FLUKE 434 para la medición de los parámetros eléctricos.

Abstrac. Firstly, this presentation/paper will analyze experimental data concerning the dynamic behavior of an induction generator with a resistive, inductive, and non-linear load to determine the relation among the speed of the rotor, the capacity, the voltage and frequencies generated, as well as the electric charge used. Secondly, some strategies will be provided for regulating the appropriate voltage and frequency for domestic power supply. The generating system consisted of: two three-phase induction motors of 3HP using 220V, a squirrel-cage rotor, one speed variator model V1000, a three-phase bank capacitor of 210 μ F per phase, and a FLUKE 434 power analyzer used to measure power system parameters.

1 INTRODUCCIÓN

El aumento en los costos de los combustibles fósiles así como su efecto contaminante hacia el ambiente y la incertidumbre de su disponibilidad a corto o mediano plazo han impulsado el desarrollo de las fuentes de energía renovable como la solar, eólica y la mini/micro-hidráulica. En poblaciones alejadas de la red eléctrica y que cuentan con recursos hidráulicos como pequeños ríos es factible la generación de la energía eléctrica distribuida, es decir, generar la energía eléctrica en el lugar donde se requiere, [1-3]. 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 a las terminales del estator un banco trifásico de capacitores,[4]. Ausencia de escobillas y de una fuente de corriente directa separada, bajo costo, mejor estabilidad, construcción sencilla, mantenimiento mínimo, robustez y autoprotección son algunas de las ventajas del generador de inducción auto-excitado lo que lo hace el generador apropiado para aplicaciones con fuentes de renovables de energía, [5].

2 GENERADOR DE INDUCCIÓN AUTOEXCITADO

El sistema de generación de energía eléctrica se llevó a cabo empleando diversos equipos como motores, sistema de acoplamiento, variador de velocidad, capacitores, contactores, interruptores termomagnéticos los cuales se describen y se muestran a continuación.

2.1 Sistema Primo-Motor.

Para el sistema que impulsa al generador de inducción auto-excitado (GIAE) se empleó un motor de inducción trifásico con rotor jaula de ardilla marca Siemens de 2.23 kW, 208-220V, 8.5-8.0 A, 4 polos y 1750 rpm, el cual se muestra en la Fig. 1. Para regular la velocidad con la que el primo motor impulsará al GIAE se emplea un variador de frecuencia modelo V1000 de la marca Yaskawa, como se presenta en la Fig.2.



Fig. 1 Motor de inducción empleado como primo motor



Fig. 2 Variador de velocidad V1000.

2.2 Banco de Capacitores.

La potencia reactiva requerida para establecer el campo magnético en el entrehierro del generador es proporcionado por un banco de capacitores con una capacitancia total por fase de 210 μF . La capacitancia puede seleccionarse con tres pasos cada uno de 70 μF , esta selección se realiza mediante la conexión de tres contactores trifásicos. El banco se muestra completo en la Fig. 3.

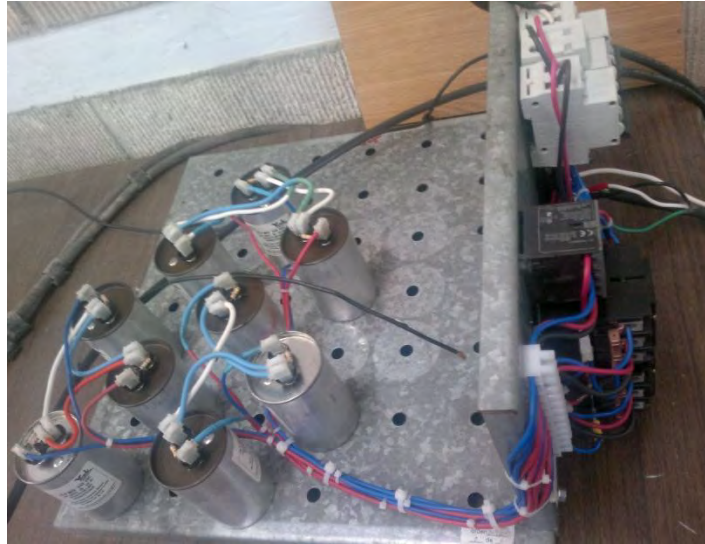


Fig. 3 Banco trifásico de capacitores de 210 μ F por fase.

2.3 Generador de inducción.

Como generador de inducción se empleó un motor de inducción trifásico con rotor jaula de ardilla marca Siemens de 2.23 kW, 208-220V, 8.5-8.0 A, 4 polos y 1750 rpm, conexión estrella el cual se muestra en la Fig. 4.



Fig. 4 Generador de inducción de 2.23 kW.

El sistema completo de generación de energía eléctrica se presenta en la Fig. 5



Fig. 5 Sistema del Generador de inducción auto-excitado

3 CARGA ELÉCTRICA

La carga eléctrica empleadas en las pruebas son focos incandescente de 75 y 100 W como cargas resistivas lineales. Focos fluorescentes de 13 W como cargas no lineales y ventiladores como cargas inductivas lineales. Para la conexión de los focos incandescentes y fluorescentes al generador se montaron portalámparas de porcelana y se empleo un interruptor termomagnético trifásico para proteger de alguna posible falla eléctrica. Esto se muestra en la Fig. 6



Fig. 6 Carga eléctrica para el generador de inducción

4 EQUIPOS DE MEDICIÓN

Una de las variables de interés en las pruebas es la velocidad del primo motor la cual se midió con un tacómetro óptico. Las variables eléctricas como tensión eléctrica, frecuencia, corriente y potencia eléctrica generada, se miden empleando el analizador de calidad de la energía FLUKE 434. El equipo se configura para medir un sistema trifásico en conexión estrella con el neutro puesto a tierra con una tensión nominal de 120 V y una frecuencia de 50 Hz. La Fig.7 muestra el equipo mencionado.



Fig. 7 Analizador de la calidad de energía FLUKE 434

5 PRUEBAS ELÉCTRICAS

5.1 Prueba en vacío

Como punto de partida de las pruebas para determinar el comportamiento del generador de inducción auto-excitado, se inicia con la prueba en vacío. Para esto se hace girar el primo motor a una velocidad de 1500 rpm ajustando el variador de frecuencia en un valor de 50 Hz. Una vez que el primo motor ha alcanzado la velocidad deseada se conecta una parte del banco de capacitores con una capacitancia de 70 μF por fase, por ultimo se conecta un segundo grupo de capacitores para obtener un total de 140 μF por fase. Con lo cual es obtiene el comportamiento que se muestra en la Fig. 8. Puede observarse que la forma de onda de la tensión eléctrica generada se encuentra distorsionada, lo que puede deberse a la saturación magnética del núcleo del generador de inducción. Se alcanza una tensión generada de 138 V en promedio y una frecuencia de 49.77 Hz. Sin embargo, los valores que se desean alcanzar son de 120 V y 50 Hz.

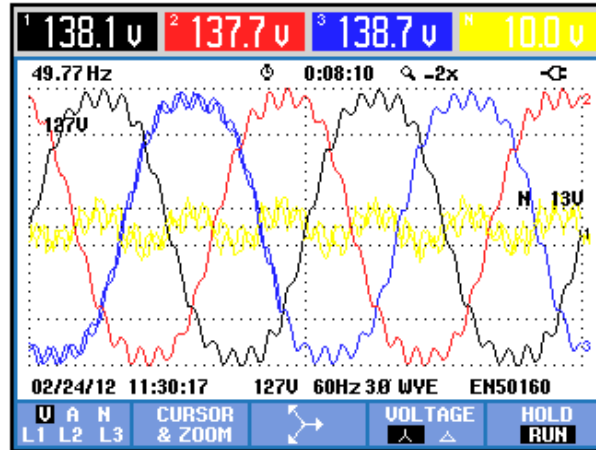


Fig. 8 Voltaje generado en vacío a 1497 rpm y 140 μF

5.2 Prueba con carga resistiva lineal

Una vez que en las terminales del estator del generador de inducción se ha establecido la tensión eléctrica se le conecta carga eléctrica empleando focos incandescentes de 75W y 100 W para un total de 2000 W de potencia. La Fig. 9 muestra las tensiones eléctricas generadas las cuales se establecen en 119.4 V en promedio con una frecuencia generada de 50 Hz. Es importante señalar que al momento de la conexión de la carga eléctrica, tanto la tensión eléctrica como la frecuencia generada se reducen. Debido a esto, se ajustó la velocidad del primo motor en 1531 rpm para que se alcanzara una frecuencia generada de 50 Hz.

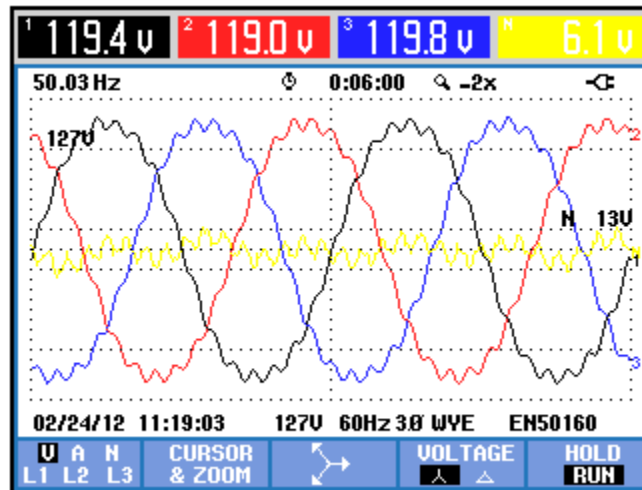


Fig. 9 Tensiones eléctricas generadas con carga resistiva a 1531 rpm y 140 μF

La Fig. 10 presenta las corrientes eléctricas que demanda la carga eléctrica, puede observarse que la forma de onda es igual a la de la tensión eléctrica con un valor de 5.2 A por fase en promedio y 50 Hz. La Fig. 11 muestra la forma de onda de la corriente y la tensión eléctrica de la fase 3 y puede determinarse que ambas están en fase lo que sugiere un factor de potencia unitario que coincide con el tipo de carga eléctrica conectada.

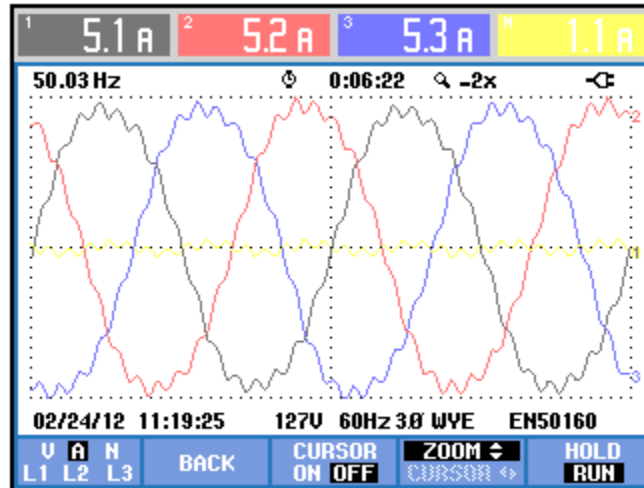


Fig. 10 Corrientes eléctricas de la carga resistiva

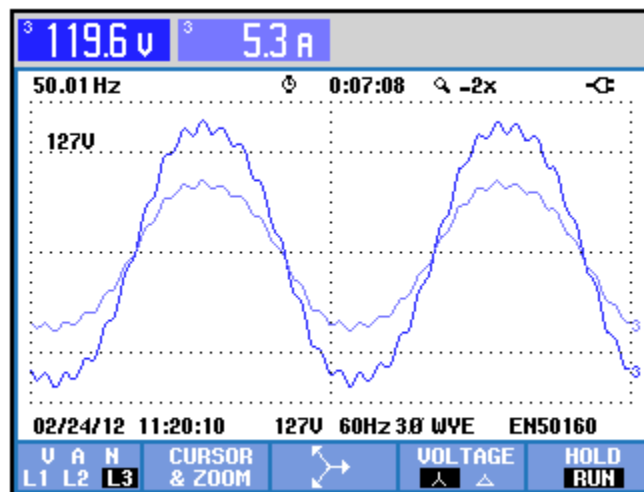


Fig. 11 Forma de onda de la tensión y corriente eléctrica para cargas resistivas

La potencia total generada es de 1850 W con un factor de potencia unitario, puede observarse en la Fig. 12 que la potencia aparente es igual a la potencia real, esto debido a lo mencionado anteriormente. Por lo tanto la conexión de carga resistiva ocasiona una disminución en la magnitud de la tensión eléctrica y de la frecuencia generada. Esto puede entenderse claramente al comparar las magnitudes de tensión y frecuencia del caso en vacío que se muestran en la Fig. 8 y el caso con carga que se muestra en la Fig. 11.



Fig. 12 Potencia eléctrica demandada por la carga resistiva

5.3 Carga inductiva no lineal

Para determinar el efecto de las cargas no lineales en el generador de inducción se emplearon lámparas fluorescentes ahorradoras de 13 W con balastro electrónico. Sin embargo, debido a que requerían aproximadamente 142 lámparas para alcanzar los 1850 W obtenidos en el caso con carga resistiva lineal se realizaron dos pruebas para comparar. En el caso de las lámparas ahorradoras se conectaron 8 de 13 W dando un total de 104 W y con las incandescentes 1 foco de 100 W. En las Figuras 13 y 14 se muestran las formas de onda obtenidas.

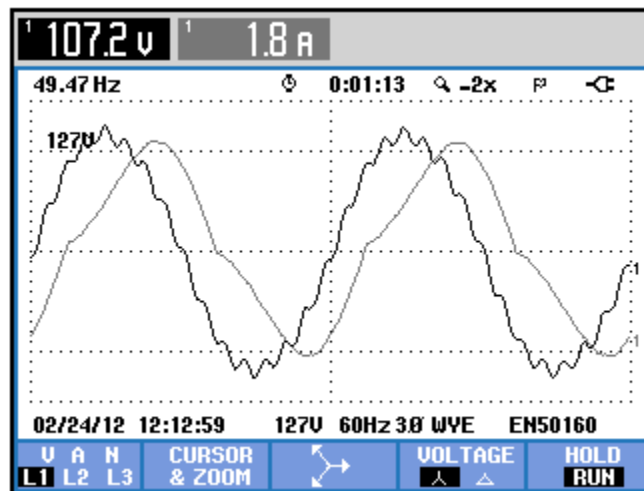


Fig. 13 Forma de onda obtenida con la carga inductiva 8 focos de 13 W, 1492 rpm y 140 μ F

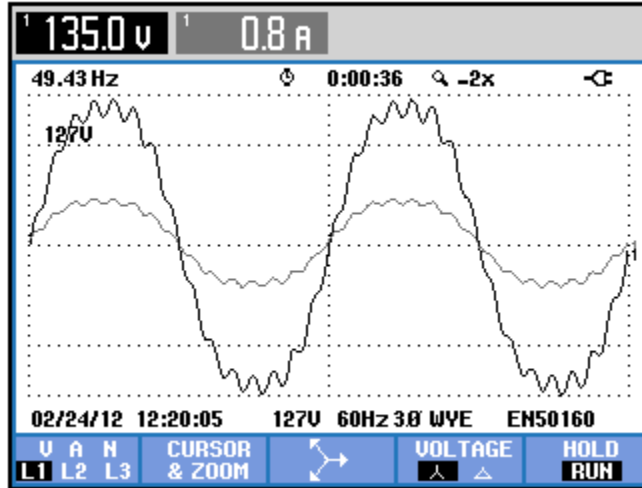


Fig.14 Forma de onda obtenida con la carga resistiva 1 focos de 100 W, 1490 rpm y 140 μ F
 Con básicamente las mismas condiciones de operación 1492 rpm y 140 μ F puede observarse diferencias en los resultados obtenidos. Primero la magnitud de la tensión eléctrica para la carga inductiva se reduce en mayor proporción que para el caso resistivo, esto se debe a que la carga inductiva requiere cierta cantidad de potencia reactiva para su funcionamiento, esta potencia reactiva la toma del banco de capacitores con lo cual se reduce la capacitancia del banco visto desde las terminales del estator del generador de inducción y por ende disminuye la tensión eléctrica generada. Por otra parte existe un ángulo de defasamiento entre la tensión y la corriente lo que origina un bajo factor de potencia de 0.58 para el caso de las lámparas ahorradoras como se muestra en la Fig. 15, para el caso resistivo y lineal la corriente y la tensión se encuentran en fase y el factor de potencia es unitario.

Potencia y energía				
FUND	0:00:06			
	L1	L2	L3	Total
kW	0.11	0.11	0.11	0.33
kVA	0.18	0.19	0.19	0.57
kVAR	0.15	0.15	0.16	0.46
PF	0.59	0.57	0.58	0.58
Cos ϕ	0.60	0.58	0.58	
A rms	1.8	1.9	1.9	
	L1	L2	L3	
V rms	104.9	104.3	104.7	
02/24/12 12:14:47 127V 60Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE	ENERGY		TREND	HOLD RUN

Fig. 15 Potencia eléctrica para las lámparas ahorradoras

6 CONCLUSIONES

Se implemento un sistema de generación de energía eléctrica empleando motores de inducción los cuales son más económicos y robustos que los generadores síncronos de la misma capacidad. Se obtuvo una potencia de 1850 W lo cual es suficiente para suministrar energía a viviendas de interés social. La tensión eléctrica esta en función de la velocidad del primo motor y de la capacitancia que suministra el banco de capacitores. Cuando una carga se conecta a las terminales del generador la magnitud de la tensión eléctrica y de la frecuencia se reduce. Un incremento en la velocidad del primo motor produce un incremento en la tensión y en la frecuencia, sin embargo, un incremento en la capacitancia solo tiene efecto sobre la magnitud de la tensión eléctrica. Es claro que cuando la carga conectada es lineal como las resistivas, se requiere de una cantidad menor de potencia reactiva o capacitancia comparado con el caso de las cargas inductivas no lineales. Cuando la carga es inductiva y no lineal, se requiere de una potencia reactiva adicional y se tiene un bajo factor de potencia. Para mantener tensión y frecuencia constantes es necesario una regulación de la velocidad del primo motor y de la capacitancia, sin embargo, esto puede ser una solución no tan viable debido a la complejidad de manejar capacitores conmutados por dispositivos electrónicos. Una opción más viable es contar con una velocidad constante de entrada así como un banco de capacitores fijos y emplear una carga en paralelo con el usuario que mantenga la potencia de salida constante, comúnmente denominados Controladores Electrónicos de Carga.

REFERENCIAS

- [1] J. B. Ekanayake, "Induction generators for small hydro schemes," *Power Eng. J.*, vol. 16, no. 2, pp. 61–67, Apr. 2002.
- [2] J. M. Elder, J. T. Boys, and J. L. Woodward, "Self-excited induction machine as a low cost generator," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 131, pt. C, no. 2, pp. 33–40, Mar. 1984.
- [3] S. Rajakaruna and N. N. Maw, "Unregulated performance of an induction generator in an isolated micro hydro power plant," in *Proc. 7th IPEC*, Nov. 29–Dec. 2, 2005, pp. 1–6.
- [4] E.D. Basset and F.M. Potter, "Capacitive excitation of induction generators", *Trans. of the Amer. Inst. Electr. Eng.*, Vol. 54, No. 5, pp. 540-545, May 1935.
- [5] R. C. Bansal, T. S. Bhatti, and D. P. Kothari, "A bibliographical survey on induction generators for application of nonconventional energy systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 3, pp. 433–439, Sep. 2003.