

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE MOTORES TRIFÁSICOS DE BAJA POTENCIA TRABAJANDO CON VARIADORES DE VELOCIDAD A DIFERENTES VELOCIDADES Y TORQUES.

Cenery Alexander Londoño Restrepo

Juan David Rey García

Programa Académico

Ingeniería Electrónica

Director(es) del trabajo de grado

Juan Guillermo Mejía Arango

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Fecha

Julio 27 de 2016

RESUMEN

Este trabajo se fundamenta en determinar la eficiencia de los motores trifásicos de baja potencia trabajando con variadores de velocidad. Para ello se utiliza el balance energético en las diferentes partes que componen el sistema de prueba de acuerdo a normas estandarizadas. Para determinar los parámetros del motor se utiliza El método B establecido por la norma IEEE 112 de 2004 que contempla dos tipos de pruebas, que son pruebas sin carga y pruebas con carga. Para desarrollar el proyecto se ha implementado un sistema compuesto por una fuente trifásica, un variador de velocidad, un motor trifásico y una carga combinada (alternador con cargas resistivas), que permiten determinar el comportamiento del motor con o sin él variador. Después de realizar pruebas a diferentes cargas se encontró que la eficiencia del sistema completo empleado (variador, motor, alternador y resistencias) aumenta al aumentar la carga, sin embargo; el uso del variador de velocidad puede causar que la eficiencia del sistema se reduzca en un 13% a carga y velocidad nominal, vale aclarar que este porcentaje fue obtenido utilizando equipos de marca siemens (Motor "1LA7 070-4YC60" y variador "Micromaster 440").

Palabras clave: Eficiencia energética, Motores de inducción, variadores de velocidad.

RECONOCIMIENTOS

En este proyecto de grado realizado en el ITM, Institución Universitaria de Medellín, queremos agradecer a todas aquellas personas las cuales directa o indirectamente a través del tiempo contribuyeron con sus distintos conocimientos y aportes a la finalización exitosa de este trabajo, resaltando principalmente a nuestro asesor el profesor Juan Guillermo Mejía, que fue el que nos motivó y acompañó constantemente con sus conocimientos, sugerencias y correcciones.

También queremos agradecer a la universidad por haber facilitado los medios materiales para poder llevar a cabo la idea de nuestro trabajo.

Por último, agradecer a nuestras familias, amigos y compañeros que nos han apoyado y acompañado todo este tiempo y que han observado y valorado el esfuerzo realizado para llevar a cabo y finalizar con éxito nuestra carrera universitaria.

A todos Muchas Gracias.

ACRÓNIMOS

THD: Coeficiente de distorsión armónico

NEMA: Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos

IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

IGBT: Transistor Bipolar de Puerta Aislada

DC: Corriente continúa

CC: Corriente directa

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 GENERALIDADES.....	8
1.2 PROBLEMA ABORDADO	9
1.3 OBJETIVOS.....	9
1.3.1 GENERAL.....	9
1.3.2 ESPECÍFICOS	9
1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	9
2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 MOTORES DE INDUCCIÓN	10
2.1.1 DESLIZAMIENTO DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN	11
2.1.2 FRECUENCIA ELÉCTRICA EN EL ROTOR.....	12
2.1.3 CONCEPTOS PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES DE INDUCCIÓN	12
2.1.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN	13
2.1.5 POTENCIA Y PÉRDIDAS EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN	14
2.2.4 EFICIENCIA DE UN MOTOR.....	17
2.2 NORMA IEEE 212 DE 1991 y 2004	17
2.2.1 EL MÉTODO A.....	17
2.2.2 EL MÉTODO DE PRUEBA B.....	18
2.2.3 EL MÉTODO DE PRUEBA C.....	20
2.2.4 EL MÉTODO F.....	20
2.2.5 EL MÉTODO C/F	21
2.2.6 EL MÉTODO E/F	21
2.2.7 EL MÉTODO E1/F1	21
3. METODOLOGÍA.....	22
3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22

3.2 METODOLOGÍA PROPUESTA	22
3.3 EQUIPOS REQUERIDOS PARA LAS PRUEBAS	23
3.3.1 GENERALIDADES Y DATOS DE INTERES	24
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
4.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SE LA ESTRUCTURA PARA ACOPLAMIENTO DE LOS EQUIPOS	25
4.1.1 PRUEBA # 1 CARACTERIZACION DEL ALTERNADOR (PERDIDAS EN LA CARGA)	27
MOTOR DE CORRIENTE CONTINÚA CON EXCITACIÓN COMPUESTA DL 1023 MARCA DE LORENZO.	28
4.1.2 PRUEBA DE VACIO MOTOR DC DE LORENZO	31
4.1.3 PRUEBA DE VACÍO MOTOR DC + ALTERNADOR SIN CARGA	32
4.1.4 PRUEBA MOTOR DC + ALTERNADOR CON CARGA (CARGA RESISTIVA 6.9Ω 20W)	33
4.1.5 PRUEBA MOTOR DC + ALTERNADOR CON CARGA (ALTERNADOR + RESISTENCIA DE 3.7Ω 30W)	34
4.1.6 PRUEBA MOTOR DC + ALTERNADOR CON CARGA (ALTERNADOR + RESISTENCIA DE 1.9Ω 60W)	35
4.2 PRUEBA # 2 SELECCIÓN DEL EQUIPO DE MEDIDA CON MEJORES PRESTACIONES PARA LA ADQUISICIÓN DE LOS DATOS EN EL VARIADOR.	36
4.2.1 Medición del sistema motor + alternador alimentados directamente de la red eléctrica 60HZ	37
4.3 PRUEBA # 3 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA.....	38
4.3.1 MEDICIÓN # 1 SISTEMA VARIADOR + MOTOR + CARGA (ALTERNADOR EN VACIO).....	38
4.3.2 MEDICIÓN # 2 SISTEMA VARIADOR + MOTOR + CARGA (ALTERNADOR + RESISTENCIA DE 6,9Ω 20W)	40
4.3.3 MEDICIÓN # 3 SISTEMA VARIADOR + ALTERNADOR + CARGA (ALTERNADOR + RESISTENCIA DE 3,9Ω 30W)	42
4.3.4 MEDICIÓN # 4 SISTEMA VARIADOR + MOTOR + CARGA (ALTERNADOR + RESISTENCIA DE 1,9Ω 60W)	44
4.3.5 EFICIENCIA TOTAL DEL SISTEMA	47
4.3.6 EFICIENCIA TOTAL DEL MOTOR.....	48
4.3.7 CALCULO DEL TORQUE O PAR.....	48
4.3.8 CALCULO DEL TORQUE SISTEMA MOTOR + ALTERNADOR EN VACIO	49
4.3.9 CALCULO DEL TORQUE SISTEMA MOTOR+ ALTERNADOR + RESISTENCIA DE 6,9Ω 20W	50

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.3.10 CALCULO DEL TORQUE SISTEMA MOTOR + ALTERNADOR + RESISTENCIA DE $3,7\Omega$ 30 W	51
4.3.11 CALCULO DEL TORQUE SISTEMA MOTOR + ALTERNADOR + RESISTENCIA DE $1,9\Omega$ 60W	52
4.4 PRUEBA # 4 DETERMINACION DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR	53
4.4.1 PARAMETROS PARA MOTOR SIEMENS DE 0.4 HP (300 Watt)	53
4.4.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN	54
4.4.3 CONSIDERACIONES.....	55
4.4.4 ENSAYO EN VACÍO	57
4.4.5 ENSAYO A ROTOR BLOQUEADO	59
4.4.6 PARÁMETROS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS.....	62
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	67
5.1 CONCLUSIÓN GENERAL.....	67
5.2 CONCLUSIONES COMPLEMENTARIAS.....	69
5.3 RECOMENDACIONES	69
6. ANEXOS	70
ANEXO A	70
ANEXO B	70
ANEXO C	71
ANEXO D.....	71
ANEXO E	72
7. BIBLIOGRAFIA	73

1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

Se ha comprobado que aproximadamente 50 % de la energía eléctrica que se consume en el mundo es a través de los motores de inducción trifásicos por constituir la fuerza motriz principal de la industria moderna. Esta realidad, unida a la crisis energética de fines del siglo pasado y principios del actual, ha motivado, por una parte, la fabricación de motores cada vez más eficientes, y por otra, la adopción de disposiciones legales por parte de los gobiernos de muchos países tendientes a obligar a los usuarios de los motores a tomar todas las medidas conducentes a la disminución del consumo de energía eléctrica de estas. (Almeida, Métodos para la determinación de la eficiencia energética en los motores de inducción trifásicos, 2000)

Este proyecto tiene como intención determinar la eficiencia de los motores de inducción de baja potencia trabajando con variadores de velocidad, a los cuales se les pueda variar y probar con diferentes frecuencias y torques. Se busca establecer una metodología que permita determinar la eficiencia de un sistema compuesto por variador de velocidad y motor trifásico de baja potencia, proponiendo una forma de variar la carga del motor. Para esto se ha desarrollado una planta física, compuesta por el motor y su transmisión mecánica hacia un alternador al que se le conecta una carga variable por pasos, que consiste en tres juegos de resistencia de potencia seleccionables desde un selector. Estos elementos quedarán disponibles en el laboratorio del ITM con el fin de que los estudiantes de máquinas eléctricas puedan implementar las prácticas relacionadas con el motor de AC de inducción.

Para establecer la metodología se tendrán en cuenta las normas que permiten calcular la eficiencia de las máquinas de corriente alterna, recorriendo cada uno de sus métodos y reconociendo cuales son los más utilizados en cuanto a pruebas y cálculos se refiere, también ayudando a que el interesado pueda escoger con criterio los instrumentos y parámetros que pueda necesitar para las pruebas.

Actualmente en la institución no se cuenta con un prototipo de planta que permita simular el comportamiento de las máquinas de corriente alterna en cuanto a su eficiencia energética, por ello se pretende implementar esta planta física para que permita complementar la parte teórico práctica del curso de máquinas eléctricas. La eficiencia de motores de inducción ha sido ampliamente tratada en el medio académico y los fabricantes de los equipos utilizan normas estandarizadas para hallarlas y consignarla en los manuales técnicos de sus productos. Sin embargo, no es muy claro lo que pasa desde el punto de vista energético; la utilización conjunta de un variador de velocidad con un motor de inducción, sobre todo al someter el sistema a diferentes velocidades y torques.

1.2 PROBLEMA ABORDADO

Existe información del comportamiento energético de los variadores de velocidad trabajando a condiciones nominales y de la eficiencia de los motores de inducción trabajando en forma aislada, pero no hay una certeza del comportamiento energético de estos dos aparatos trabajando en un sistema a diferentes condiciones de carga y velocidad. Por medio de este proyecto se pretende determinar la eficiencia de motores trifásicos de baja potencia trabajando con variadores de velocidad incorporados en una planta que permita someter el sistema a las condiciones mencionadas en el párrafo anterior.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

Establecer una metodología para determinar la eficiencia de motores trifásicos de baja potencia trabajando con variadores de velocidad a diferentes velocidades y torques.

1.3.2 ESPECÍFICOS

- Implementación de un banco de prueba para el desarrollo de los ensayos del sistema variador-motor de inducción.
- Determinar la eficiencia de un sistema variador-motor a diferentes frecuencias.
- Determinar los parámetros de un motor de inducción de baja potencia bajo la norma IEEE 112 DE 2004.

1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En el marco teórico se realiza una introducción al principio de funcionamiento de los motores de inducción, su modelado eléctrico, el balance energético, pruebas normalizadas para determinar el rendimiento y parámetros del motor. Como parte de la metodología se realiza el planteamiento del problema y se proponen las pruebas que se deben realizar de acuerdo a normatividades vigentes y se identifican los equipos de medida requeridos.

En el capítulo de resultados y discusión se documenta el diseño de la planta para la realización de las pruebas y se procede al desarrollo de las mismas y al análisis de resultados de acuerdo a las eficiencias obtenidas. También se realizan las pruebas para determinar los parámetros del motor y con ellos también se encuentran las eficiencias del motor de inducción. Finalmente, se enuncian las conclusiones más importantes y se dan las recomendaciones para trabajos futuros.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 MOTORES DE INDUCCIÓN

El motor de inducción es el tipo más popular de los motores de CA debido a su simplicidad y su facilidad de operación. El motor de inducción no tiene un circuito de campo separado; en cambio, depende de la acción transformadora para inducir voltajes y corrientes en su circuito de campo. De hecho, un motor de inducción es básicamente un transformador giratorio. Su circuito equivalente es similar al de un transformador, excepto en las variaciones de velocidad. (Chapman, 2005)

Un motor de inducción opera por lo regular cerca de la velocidad síncrona, pero nunca exactamente a ella. Siempre debe haber cierto movimiento relativo para inducir un voltaje en el circuito de campo del motor de inducción. El voltaje inducido en el rotor por el movimiento relativo entre el campo magnético del estator y el rotor produce una corriente en el rotor que interactúa con el campo magnético del estator para producir el par inducido en el motor.

En un motor de inducción el deslizamiento o velocidad a la que se presenta el par máximo se puede controlar variando la resistencia del rotor. El valor del par máximo es independiente de la resistencia del rotor. Una alta resistencia del rotor disminuye la velocidad a la que se presenta el par máximo y por tanto incrementa el par de arranque del motor. Sin embargo, paga un precio por este par de arranque al tener una regulación de velocidad muy pobre en su intervalo normal de operación. (Chapman, 2005). En la figura 1 se muestran las partes que constituyen un motor trifásico de inducción jaula de ardilla.

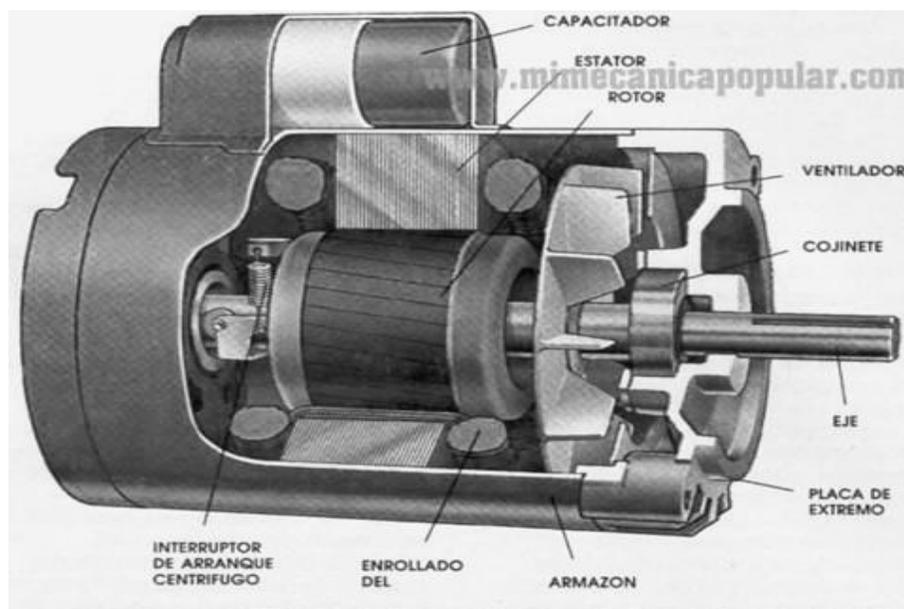


Figura 1. Motor de Inducción. (Mi mecanica popular, 2003)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.1.1 DESLIZAMIENTO DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

El voltaje inducido en una barra del rotor de un motor de inducción depende de la velocidad del rotor con respecto a los campos magnéticos. Puesto que el comportamiento de un motor de inducción depende del voltaje y la corriente del rotor, con frecuencia es más lógico hablar de su velocidad relativa. En general se utilizan dos términos para definir el movimiento relativo entre el rotor y los campos magnéticos. Uno de ellos es la velocidad de deslizamiento, definida como la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor:

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde n_{des} Velocidad de deslizamiento de la máquina
 n_{sinc} Velocidad de los campos magnéticos
 n_m Velocidad mecánica del eje del motor
 n_ω Velocidad angular del eje del motor

El otro término utilizado para describir el movimiento relativo es el deslizamiento, el cual es la velocidad relativa expresada sobre una base en por unidad o en porcentaje. El deslizamiento está definido como:

$$S = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} * 100\% \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Si lo expresamos en términos de la frecuencia angular (ω), sería:

$$S = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{sinc}} * 100\% \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Ahora si se quiere expresar la velocidad mecánica del eje del rotor en términos de la velocidad sincrónica y el deslizamiento; Se puede resolviendo las ecuaciones 4 y 5. Para la velocidad mecánica se obtiene:

$$n_m = (1 - s)n_{sinc} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

$$\omega_m = (1 - s)n_\omega \quad \text{(Ecuación 4.1)}$$

$$\omega_{sinc} = (n_{sinc}) \left(\frac{2\pi rad}{1r} \right) \left(\frac{1min}{60s} \right) \quad \text{(Ecuación 4.2)}$$

Estas ecuaciones son útiles en la deducción del par del motor de inducción y en las relaciones de potencia.

2.1.2 FRECUENCIA ELÉCTRICA EN EL ROTOR

Un motor de inducción trabaja induciendo tensiones y corrientes en el rotor de la máquina; por esa razón, a veces se le llama transformador rotante. Como transformador, el primario (estator) induce un voltaje en el secundario (rotor) pero, a diferencia del transformador, la frecuencia secundaria no es necesariamente la misma que la frecuencia primaria.

Si el rotor de un motor está bloqueado tal que no puede moverse, el rotor tendrá la misma frecuencia que el estator. Por el contrario, si el rotor gira a velocidad sincrónica, la frecuencia en el rotor será cero. La velocidad mecánica del eje del motor es igual a revoluciones por minuto, la frecuencia del rotor es igual a frecuencia eléctrica y el deslizamiento igual a uno. Cuando la velocidad mecánica del eje del motor es igual a la de velocidad de sincronismo la frecuencia del rotor es igual a cero Hertz y el deslizamiento igual a cero. Para cualquier velocidad intermedia, la frecuencia del rotor es directamente proporcional a la diferencia entre la velocidad del campo magnético n_{sinc} y la velocidad del rotor n_m . Puesto que el deslizamiento del rotor está definido como. (Chapman, 2005):

$$S = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

La frecuencia del rotor puede ser expresada como:

$$f_r = S f_e \quad \text{(Ecuación 5)}$$

2.1.3 CONCEPTOS PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES DE INDUCCIÓN

1. Variar el deslizamiento. Existen dos mecanismos para variar el deslizamiento, uno es por variación de la tensión de alimentación a través del control del ángulo de disparo de tiristores pero el rango de variación es limitado. El segundo solo es aplicable a motores de inducción de anillos rozantes y consiste en agregar resistencias rotóricas variables. Este método reduce grandemente la eficiencia de la máquina a la vez que es muy simple.
2. Variar la velocidad sincrónica. Esto se consigue variando la frecuencia de la tensión de alimentación a través de sistemas electrónicos llamados “variadores de frecuencia o generadores electrónicos” con los cuales es posible ajustar la velocidad por encima o por debajo de la velocidad nominal.

$$n_{sinc} = \frac{120fe}{P} \text{ (Ecuación 6)}$$

3. Cambiar el número de polos P. Se aplica en motores que poseen bobinados múltiples de modo que con conexiones externas sea posible cambiar el número de polos. La variación por tanto es discreta, es decir solo se pueden obtener variaciones fijas de 1800, 1200, 900, 600 rpm.

2.1.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN

Un motor de inducción depende para su funcionamiento de que el circuito del estator induzca voltajes y corrientes en el circuito del rotor (acción transformadora). Puesto que la inducción de voltajes y corrientes en el circuito del rotor de un motor de inducción es, esencialmente una acción de transformación, el circuito equivalente de un motor eléctrico de inducción terminará por ser muy similar al circuito equivalente de un transformador.

Como en cualquier transformador, hay una cierta resistencia y auto inductancia en los embobinados primarios (estator), los cuales se representan en el circuito equivalente de la máquina. La resistencia del estator se denominará R_1 y la reactancia de dispersión del estator X_1 . Ambos componentes aparecen justo a la entrada del modelo de la máquina. También, como en cualquier transformador con un núcleo de hierro, el flujo de la máquina está relacionado con el voltaje aplicado E_1 . La existencia de un entrehierro del motor de inducción, que aumenta enormemente la reluctancia de la trayectoria del flujo y por tanto debilita el acoplamiento entre el primario y el secundario. A mayor reluctancia causada por el entrehierro, mayor corriente de magnetización se necesita para lograr un nivel de flujo determinado. Por lo tanto, la reactancia de magnetización en el circuito equivalente X_M tendrá un valor menor que el correspondiente a un transformador. Para modelar las pérdidas en el núcleo es necesaria además la resistencia R_c .

El voltaje interno del estator E_1 se acopla con el secundario E_R por medio de un transformador ideal de relación de espiras a_{ef} . (Chapman, 2005).

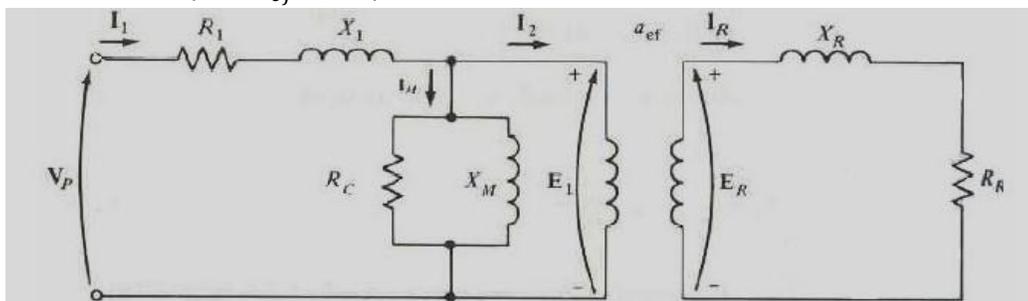


Figura 2. Circuito equivalente inicial de un motor de inducción. (Chapman, 2005)

Finalmente se traslada los voltajes, corrientes e impedancias del secundario al primario por medio de la relación de espiras del transformador.

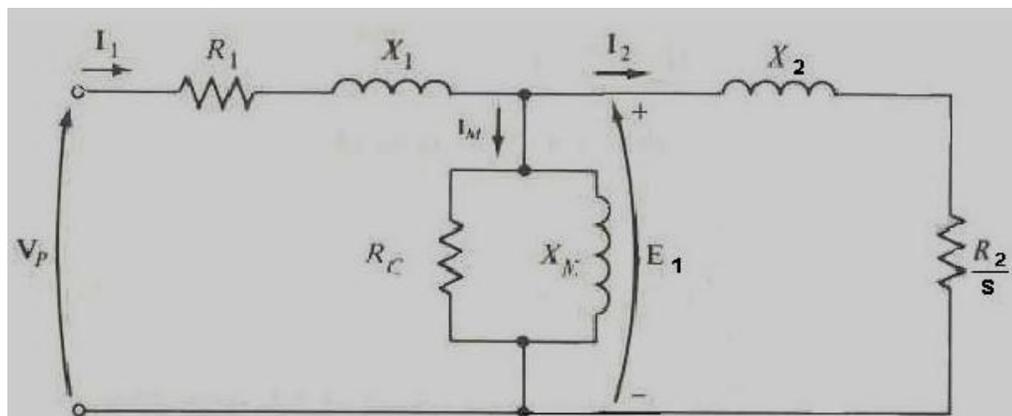


Figura 3. Circuito equivalente final de un motor de inducción. (Chapman, 2005)

2.1.5 POTENCIA Y PÉRDIDAS EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

La potencia de entrada al motor de inducción P_{in} se presenta en forma de voltajes y corrientes eléctricas trifásicas. Las primeras pérdidas encontradas en la maquina son I^2R en los devanados del estator (pérdidas en el cobre del estator P_{SCL}). Luego, alguna cantidad de potencia se pierde por histéresis y por corrientes parasitas en el estator (P_{Nucleo}). La potencia remanente en este punto se transfiere al rotor de la máquina a través del entrehierro situado entre el rotor y el estator, Esta potencia es llamada potencia en el entrehierro P_{AG} de la maquina. Despues que la potencia ha sido transferida al rotor, algo de ella se disipa como perdidas I^2R (pérdidas en el cobre del rotor P_{rcl}), y la restante se convierte de potencia eléctrica en mecánica P_{Conv} . Por último, las pérdidas por rozamiento propio y por rozamiento con el aire $P_{F\&W}$ y las perdidas miscelaneas P_{mis} se restan. La potencia restante es la de salida del motor P_0 . (Chapman, 2005)

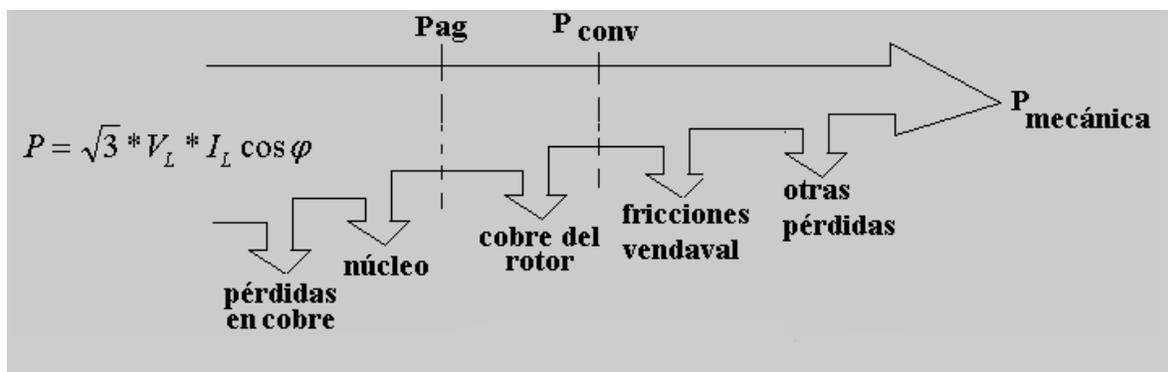


Figura 4. Tipos de pérdidas en el motor de inducción. (Chapman, 2005)

Impedancia referida de rotor es:

$$Z_r = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad \text{(Ecuación 7)}$$

La impedancia de magnetización más la del rotor combinada

$$Z_f = \frac{1}{\frac{1}{jX_m} + \frac{1}{Z_r}} \quad \text{(Ecuación 7.1)}$$

La impedancia total está dada por

$$Z_T = Z_{est} + Z_f \quad \text{(Ecuación 7.2)}$$

La corriente resultante del estator:

$$I_{estator} = \frac{V_\theta}{Z_T} \quad \text{(Ecuación 7.3)}$$

El factor de potencia del motor:

$$PF = \cos \theta \quad \text{(Ecuación 8)}$$

La potencia de entrada del motor sería

$$P_{in} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta \quad \text{(Ecuación 8.1)}$$

Pérdidas en el estator:

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \quad (w) \text{ vatios} \quad \text{(Ecuación 8.2)}$$

$$P_{NU} = \frac{3V^2}{R_C} \quad (w) \text{ vatios} \quad \text{(Ecuación 8.3)}$$

Pérdidas en el rotor:

$$P_{ROT} = (3I_2^2 R_2) \quad (w) \text{ vatios} \quad \text{(Ecuación 8.4)}$$

$$P_{ROT} = (SP_{AG})(w) \text{ vatios} \quad \text{(Ecuación 8.5)}$$

$$P_{AG} = (P_i - P_{SCL} - P_{NU})(w) \text{ vatios} \quad \text{(Ecuación 8.6)}$$

$$P_{AG} = \left(3I_2^2 \frac{R_2}{s}\right) (w) \text{ vatios} \quad \text{(Ecuación 8.7)}$$

$$P_{Conv} = (P_{AG} - P_{ROT})(w) \text{ vatios} \quad \text{(Ecuación 8.8)}$$

$$P_{Conv} = \left(3I_2^2 R_2 \frac{(1-s)}{s}\right) (w) \text{ vatios} \quad \text{(Ecuación 8.9)}$$

$$P_{Conv} = (P_{AG} (1 - S)) (w) \text{ vatios} \quad \text{(Ecuación 8.10)}$$

Potencia de salida o mecánica

$$P_0 = P_{out} = P_{conv} - P_{rot} (w) \text{ vatios} \quad \text{(Ecuación 8.11)}$$

Torque inducido por la máquina (interno)

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \left(\frac{P_{AG}}{\omega_s}\right) (N.m) \text{Newtons} . \text{metro} \quad \text{(Ecuación 9)}$$

Donde ω_m es la Velocidad del motor y ω_s es la velocidad sincrónica del campo giratorio.

Torque de carga

$$\tau_c = \left(\frac{P_0}{\omega_m}\right) (N.m) \text{Newtons} . \text{metro} \quad \text{(Ecuación 10)}$$

(Chapman, 2005)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.4.4 EFICIENCIA DE UN MOTOR

La eficiencia de un motor es la relación entre la potencia mecánica de salida y la potencia eléctrica de entrada. Este es el concepto más importante desde el punto de vista del consumo de energía y del costo de operación de un motor eléctrico. La eficiencia se puede expresar de las siguientes maneras. (Comisión Nacional Energía Eléctrica, 2010):

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ Mecanica\ de\ salida - perdidas}{Potencia\ Electrica\ que\ entra} \quad \text{(Ecuación 11)}$$

2.2 NORMA IEEE 212 DE 1991 y 2004

(Society, 4 November 2004)

El propósito de esta norma es entregar una serie de instrucciones para la realización de las pruebas y el reporte de resultados de las mismas para determinar el rendimiento y características de los motores y generadores de inducción polifásicos.

El estándar presenta 11 métodos que permiten calcular la eficiencia de las máquinas de corriente alterna. Para cada método se especifica el tipo de máquinas para las cuales es más aplicable, las pruebas y cálculos que se deben realizar para encontrar la eficiencia de la máquina y algunos criterios para la selección de los instrumentos que se requerirán en las pruebas. Adicionalmente al final se recomiendan algunas pruebas adicionales y se sugieren algunas formas para el reporte de los resultados obtenidos.

Adicionalmente la norma presenta las recomendaciones y especificaciones mínimas de la red y los instrumentos de medición que deben utilizarse en la realización de las pruebas. Algunas de estas especificaciones indican que el nivel de armónicos de tensión ha de ser inferior al 10%, la frecuencia de la red de alimentación utilizada para las pruebas no debe tener un error superior al $\pm 0.1\%$, no se deben producir variaciones de frecuencia de más del 0.33% durante los ensayos, la asimetría de las tensiones no puede exceder el 0.5%, la medida del par no debe tener un error superior al $\pm 0.2\%$ (Método B), finalmente, para el tacómetro, el error máximo será de ± 1 rpm.

Los métodos presentados por la IEEE 112 para la determinación de la eficiencia de las máquinas de corriente alterna se presentan a continuación de manera general.

2.2.1 EL MÉTODO A (medida de las potencias de entrada y de salida) consiste en la medición directa de las potencias de entrada y salida, haciendo corrección de las mediciones de

temperatura y del dinamómetro si es necesario. Este método se recomienda para motores cuya potencia nominal es menor a 1 kW, Para este método la eficiencia se calcula como la proporción de la medida de la potencia de salida a la medida de potencia absorbida o de entrada, después, si aplica, se corrigen la temperatura y la medición del dinamómetro.

2.2.2 EL MÉTODO DE PRUEBA B consiste en la medición de la potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas y medidas directas de pérdidas de carga, este método consiste en calcular la eficiencia haciendo una segregación de pérdidas de la máquina. Este método es aplicable operando la máquina como un motor o generador dependiendo de la forma de operación para la cual se requiere el cálculo de la eficiencia. La pérdida total aparente (entrada menos salida) es segregada en varios componentes con las pérdidas de carga dispersas definidas como la diferencia entre las pérdidas totales aparentes y la suma de las pérdidas convencionales (pérdida en el estator y rotor I^2R , pérdidas en el núcleo y pérdidas por fricción y ventilación). El valor de las pérdidas dispersas de carga determinado de esta forma se grafica contra el cuadrado del torque y se usa una regresión lineal para reducir el efecto de errores aleatorios en las medidas de la prueba. Los datos de la curva se usan para calcular el valor final de las pérdidas totales y la eficiencia. Por este método pueden probarse máquinas verticales en el rango de 1-300kW, siempre y cuando los rodamientos permitan la realización de las pruebas.

El **método B** IEEE 112, contempla varios tipos de pruebas, que son pruebas sin carga, pruebas de temperatura y pruebas con carga aplicada. Durante la prueba sin carga el motor es conectado a voltaje y frecuencia regulada, se deja correr libre de carga hasta que la lectura de un vatímetro en la entrada muestra una lectura estable, lo que puede durar desde un instante hasta algunas horas. Cuando la lectura está estable, se procede a hacer lecturas de voltaje y corriente variando el voltaje desde un valor de 125% del valor del voltaje nominal, hasta un valor de voltaje mínimo donde la corriente motriz también caiga junto con el voltaje.

Usando estas lecturas combinadas con la temperatura del aire del ambiente, el aire que circula debido al ventilador de enfriamiento y la resistencia por rozamiento del aire, se puede obtener dos tipos de pérdidas del motor, las pérdidas en el hierro y las pérdidas por fricción y ventilación. Las pérdidas en el hierro variarán con el voltaje mientras que las pérdidas por fricción permanecerán relativamente constantes, ya que la velocidad de giro también se mantendrá constante. También se definen las pérdidas en el cobre del estator midiendo la corriente que circula en el estator y midiendo la resistencia del mismo cuando el motor no está energizado.

Cuando se observa el comportamiento en bajo voltaje, se puede sacar una constante de pérdidas por fricción, si restamos esta constante de las medidas tomadas en alto voltaje a 125% del voltaje nominal determinaremos la constante de pérdidas en el hierro.

Las mediciones de temperatura involucran pruebas en el motor bajo condiciones de carga controlada, a voltaje y frecuencia nominales, estas mediciones indican que tan estable se puede mantener el voltaje de entrada para una carga constante, este procedimiento se mantiene hasta que el motor alcanza una temperatura estable, la prueba será satisfactoria cuando la temperatura del motor no varíe más de un grado centígrado en un período de treinta minutos. Las pruebas bajo carga son realizadas con valores de frecuencia y voltaje nominales, aplicando seis diferentes cargas al motor.

Empezando desde valores de 25 % de la carga nominal del motor, con incrementos del 25 % del valor de la carga nominal hasta llegar a un valor de 1.5 veces el valor de carga nominal. El comportamiento de variables como el torque, corriente, velocidad de giro del motor, temperatura nos darán información que nos indican cómo se comporta el motor en diferentes niveles de carga.

Hasta este punto las mediciones al motor están completas y se comienza el análisis. Las pérdidas conocidas o calculadas directamente provienen de la tabulación de las lecturas, teniendo la consideración que las temperaturas de operación se han mantenido sin variaciones severas, se definen las pérdidas para los seis diferentes niveles de carga que se mencionaron anteriormente. Las pérdidas en el hierro y las pérdidas por fricción se determinan en el análisis de no carga o prueba de vacío, y son consideradas constantes en todos los análisis. La resistencia por rozamiento mecánico, por el aire y rodamientos, serán susceptibles a correcciones por temperatura, y la medición de corriente y el voltaje aplicado nos darán el resultado de las pérdidas por el cobre en el estator.

Como la velocidad de giro del motor es conocida, el valor del deslizamiento del motor también será conocido, ya que el deslizamiento es la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad de giro del rotor. Conociendo el deslizamiento, la potencia de entrada, y las otras pérdidas en los diferentes niveles de carga, se determinan las pérdidas en el rotor, aparte nos queda un grupo de pérdidas por definir que son las pérdidas por dispersión, típicamente los valores de este tipo de pérdida son del rango del 1% por lo que su determinación queda fuera del alcance práctico del método.

Debido a que las pruebas descritas anteriormente dependen mucho de la precisión de los instrumentos de medición que se utilizan y que la variación en los cálculos realizados son afectados muchas veces por el error humano, los fabricantes de motores eléctricos recurren a entidades debidamente autorizadas por los institutos de normalización internacional para que certifiquen o avalen la eficiencia de los motores que ponen a disposición del consumidor, por lo que no es común que los usuarios promedio o comunes realicen estas pruebas, sino que den al fabricante los certificados de prueba de eficiencia que están publicados en las placas de identificación de los motores. En la mayoría de los casos en la placa de identificación de los motores no aparecen los resultados de todas las pruebas; sino que hacen referencia a una clasificación de eficiencia basada en los estándares NEMA.

2.2.3 EL MÉTODO DE PRUEBA C puede ser usado para la determinación de la eficiencia cuando se dispone de máquinas dobles. Las dos máquinas son acopladas juntas y conectadas eléctricamente a dos fuentes de potencia. Siendo ajustada la frecuencia de una de las máquinas. Ambas fuentes de potencia deben encontrarse según los requerimientos en los cuales la forma de la onda debe ser estrechamente senoidal, además de que el coeficiente de distorsión armónico THD no exceda el 0.05.

El coeficiente de distorsión armónico se define como:

Cálculo del coeficiente de distorsión armónico

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{E^2 - E_1^2}}{E_1} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde E_1 es el valor de la raíz cuadrada del principio de la onda de voltaje y E es el valor total de la raíz cuadrada de la onda de voltaje. Además del factor de distorsión armónico se debe tener también en cuenta el desequilibrio del voltaje el cual no debe exceder el 0.5%. El porcentaje del desequilibrio del voltaje iguala 100 veces la desviación del máximo voltaje del voltaje promedio dividido por el voltaje promedio. Las pérdidas de carga dispersa se determinan mediante el método directo.

La eficiencia mediante los métodos de **prueba E o E1** es la medida de la potencia eléctrica con segregación de pérdidas, este método de prueba se realiza para medir la potencia de entrada y determinar la potencia de salida sustrayendo las pérdidas totales de la entrada. Las pérdidas totales son igual a la suma de las pérdidas en el rotor corregidas a la temperatura especificada para la corrección de la resistencia, pérdida en el núcleo, fricción y pérdidas por ventilación o Fricción del aire y pérdidas de carga dispersa.

2.2.4 EL MÉTODO F (cálculo del circuito equivalente con medida directa de las pérdidas adicionales) **o F1** (cálculo del circuito equivalente asumiendo un valor para las pérdidas adicionales). En general estos dos métodos consisten en el cálculo del circuito equivalente con medidas directas de pérdida de carga dispersa, cuando no se realiza la prueba bajo carga, las características de operación se calculan basadas en el circuito equivalente. Los parámetros en el circuito equivalente se calculan con los datos obtenidos en las pruebas de vacío e impedancia. La predicción exacta de características de la máquina, en el rango de operación normal dependerá primero de la precisión con que R_2 represente la resistencia real del rotor a corrientes de baja frecuencia y segundo de la precisión con que X_2 represente la reactancia de dispersión real del rotor a corrientes de baja frecuencia. Por consiguiente, es indispensable determinar con especial cuidado las características del rotor a baja frecuencia.

PRUEBA DE EFICIENCIA MÉTODO C/F, E/F O E1/F1 CIRCUITO EQUIVALENTE CALIBRADO CON UN PUNTO DE CARGA

Cuando un punto de la prueba bajo carga a temperatura del estator t_t está disponible el circuito equivalente puede calibrarse encontrando los mejores valores para R_2 y X_M . El siguiente procedimiento se usa después del valor inicial para los parámetros que hayan sido determinados del circuito equivalente. Use las formas F y F1, pero comience con la segunda línea asumiendo el valor de R_2/s para la prueba de punto de carga y el valor de R_1 basado en la temperatura del bobinado del estator t_t . Luego de realizar los cálculos de potencia del estator compruebe el valor calculado de la corriente y la potencia de entrada con los valores medidos. Ajuste R_2/s y X_M y repita hasta que ambos valores calculados, potencia y corriente de entrada, concuerden en 1% con los medidos. Los otros parámetros del circuito no deben ajustarse (La potencia de entrada es principalmente una función de R_2/s). Obtenga R_2 multiplicando el último valor asumido de R_2/s por el valor medido de deslizamiento por unidad de la velocidad sincrónica. Este procedimiento establece el valor de R_2 (sin corrección de temperatura) para ser usado en el cálculo de las características de rendimiento de la carga. Corrija R_1 y R_2 a la temperatura especificada t_s .

2.2.5 EL MÉTODO C/F: consiste en calcular el circuito equivalente calibrado por los puntos de carga del método C con medición indirecta de las pérdidas dispersas de carga.

2.2.6 EL MÉTODO E/F: consiste en calcular el circuito equivalente calibrado por los puntos de carga del método E con medición directa de las pérdidas dispersas de carga.

2.2.7 EL MÉTODO E1/F1: consiste en calibrar el circuito equivalente para un punto de carga del método E y asumir un valor para las pérdidas de carga dispersas. Las máquinas de potencias superiores a 300 kW pueden probarse por los métodos B, B1, C, E1, F o F1 dependiendo de la factibilidad de la prueba; si la estructura de los rodamientos no permite probar la máquina por el método B, pueden usarse los métodos E, E1, F o F1. Cuando se requiere precisión y se tiene la posibilidad de repetir la prueba se recomienda usar el método B.

La finalidad entonces de la propuesta consiste en practicar métodos que permitan conocer el consumo de energía de cada motor instalado y su eficiencia utilizando los métodos de la norma IEEE para establecer de manera clara y coherente la forma de realizar las pruebas y determinar la eficiencia.

3. METODOLOGÍA

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existe información del comportamiento energético de los variadores de velocidad trabajando a condiciones nominales y de la eficiencia de los motores de inducción trabajando en forma aislada, pero no hay una certeza del comportamiento energético de estos dos aparatos trabajando en un sistema a diferentes condiciones de torque y velocidad. Por medio de este proyecto se pretende determinar la eficiencia de motores trifásicos de baja potencia trabajando con variadores de velocidad incorporados en un banco de prueba que permita someter el sistema a diferentes condiciones de carga y de velocidad.

3.2 METODOLOGÍA PROPUESTA

Este trabajo está basado en abordar la teoría de máquinas eléctricas y normas que rigen la determinación de la eficiencia en motores de inducción; para lo cual se llevaron a cabo un seriado de pruebas con instrumentos y analizadores de medidas encontrados en el laboratorio de la institución. Para dar cumplimiento a los objetivos específicos se realizan cuatro pruebas que consisten en lo siguiente:

PRUEBA 1: Para medir el torque o potencia mecánica entregada por el motor se debe utilizar un torquímetro y un freno para simular la carga del motor. Estos equipos son costosos y la institución no los tiene disponibles en el laboratorio de máquinas eléctricas. Se indagó en otras universidades e instituciones tecnológicas de la región y tampoco disponen de estos equipos, sobre todo para máquinas de baja potencia. Una metodología para conocer en forma indirecta la carga del motor es conectarlo a un alternador y a este colocarle resistencias eléctricas de valor conocido. Se debe caracterizar el alternador para conocer la potencia total de la carga, esto es; la potencia de las resistencias más la potencia demandada por el generador para su funcionamiento interno. De esta forma conociendo la potencia demandada por las resistencias de carga; se conocerá la potencia entregada por el motor.

PRUEBA 2: Se determinan los parámetros de ajuste del equipo de medida a utilizar a la salida del variador de velocidad. Los analizadores de redes y medidores de potencia por lo general vienen

configurados para trabajar a una frecuencia entre 45 y 60 Hz de ondas senoidales. A la salida del variador se van a tener frecuencias que pueden ser inferiores y la forma de onda de voltaje puede tener distorsiones y armónicos, por lo que se requiere que el equipo de medida incorpore filtros especiales para garantizar el valor confiable de las variables sensadas.

PRUEBA 3: El objetivo principal de esta prueba es determinar la eficiencia del sistema variador + motor con unas cargas específicas y a unas velocidades establecidas. El procedimiento se acoge a lo establecido en la norma IEEE 112 de 2004.

PRUEBA 4: Se obtienen los parámetros del motor a través del circuito equivalente utilizando el método circuito abierto y rotor bloqueado recomendado en la norma IEEE 112 de 2004.

Las realizaciones de estas pruebas permiten alcanzar los objetivos específicos, previamente se construyó una planta para acoplar de forma fácil y rápido los equipos requeridos para la realización de dichas pruebas cumpliendo así con el objetivo específico # 1.

Para realizar las pruebas mencionadas se deben seguir los siguientes pasos:

- Diseño e implementación de una planta para desarrollar las pruebas.
- Selección y verificación de los instrumentos de medida a utilizar.
- Caracterización de la carga.
- Determinar la potencia en los diferentes puntos del sistema y establecimiento del balance energético.
- Hallar las eficiencias para las diferentes cargas del motor a estudiar.
- Por último, se encuentran los parámetros del motor siguiendo las recomendaciones de la norma IEEE 112 de 2004.

3.3 EQUIPOS REQUERIDOS PARA LAS PRUEBAS

- ALTERNADOR DE CHEVROLET SPARK 12VDC 75AMP.
- MOTOR SIEMENS REF 1LA7 070-4YC60 0.4HP 1.6AMP.
- VARIADOR SIEMENS MICROMASTER 440.
- CONJUNTO DE RESISTENCIAS (1Ω 100W, 1,9Ω 60W, 3,7Ω 30W 5,9Ω 20W).
- ACOPLER, EJES, POLEAS ETC.
- ESTRUCTURA METALICA PARA ACOPLAMIENTO Y MONTAJE DEL SISTEMA REQUERIDO.
- ANALIZADORES DE REDES MARCA FLUKE SELECCIONADOS.
- TACOMETRO DIGITAL.

3.3.1 GENERALIDADES Y DATOS DE INTERES



Figura 5. Foto del tamaño constructivo del motor (COLOMBIA). (SIEMENS S. A., 2013)

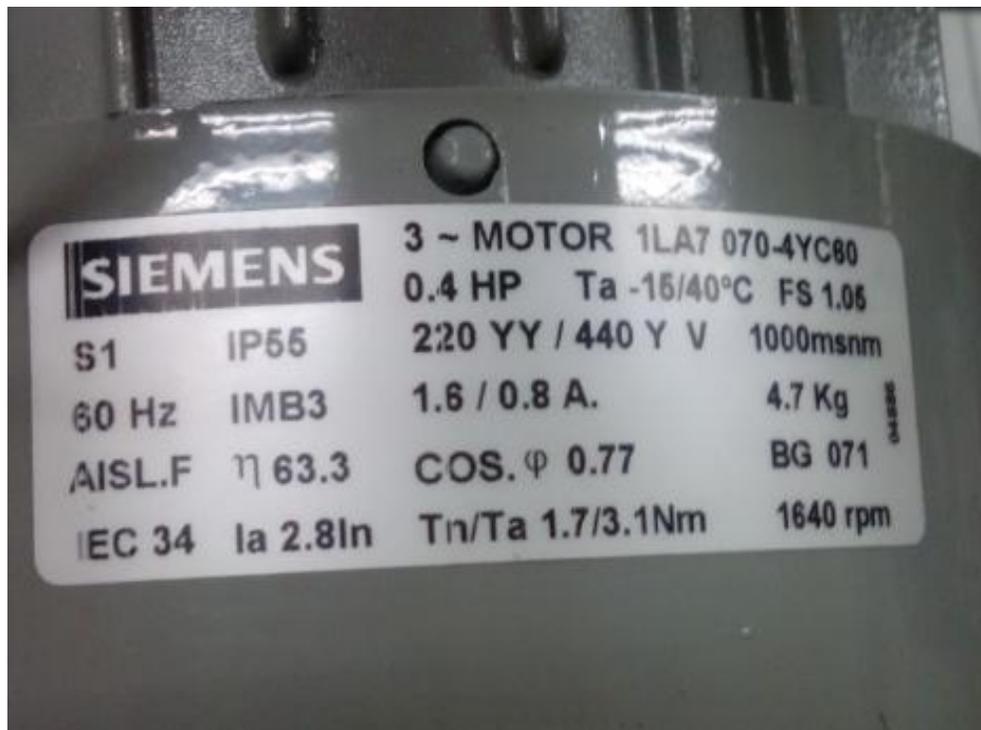


Figura 6. Fotos con los datos de placa del motor SIEMENS. (Elaboracion propia, 2016)



Figura 7. Imagen MICROMASTER 440. (SIEMENS)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SE LA ESTRUCTURA PARA ACOPLAMIENTO DE LOS EQUIPOS

Diseño y construcción de la estructura para acoplamiento de los equipos (motor, alternador, resistencias) requeridos durante las pruebas a realizar. En la figura 8 se puede observar como el variador de velocidad toma la energía de la red trifásica a 60Hz. Con esto queda habilitado para alimentar el motor a diferentes voltajes y frecuencias de acuerdo a la velocidad requerida. Como carga del motor se utiliza un alternador que debe ser caracterizado para encontrar su requerimiento energético ante diferentes cargas. Estas últimas están constituidas por resistencias de potencia de valor conocido y a las que se les puede medir fácilmente su consumo energético.

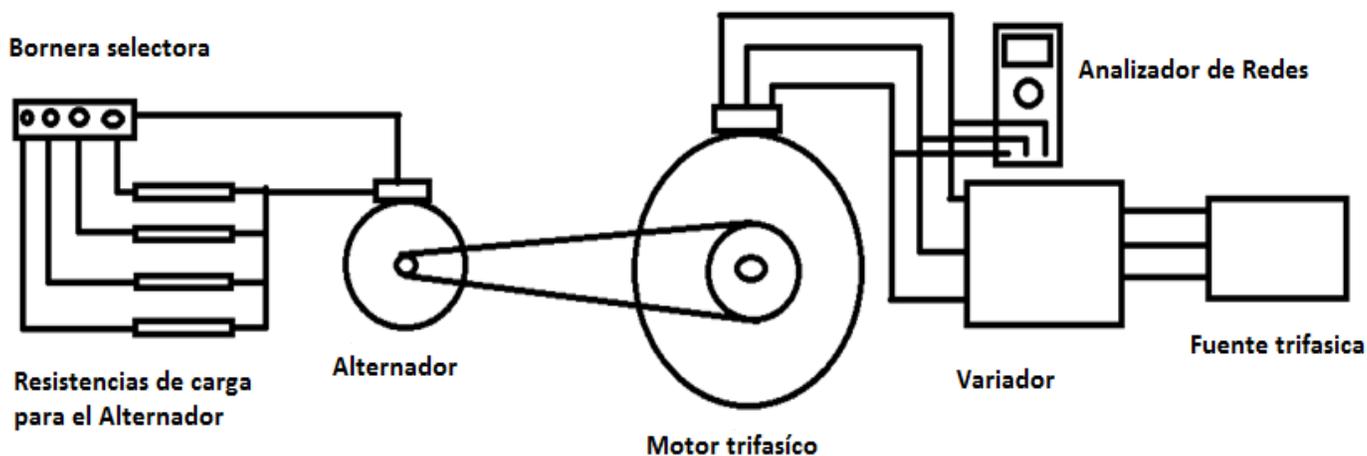


Figura 8. Diseño de la estructura implementa con variador de velocidad MICROMASTER 440.
(Elaboracion propia, 2016)

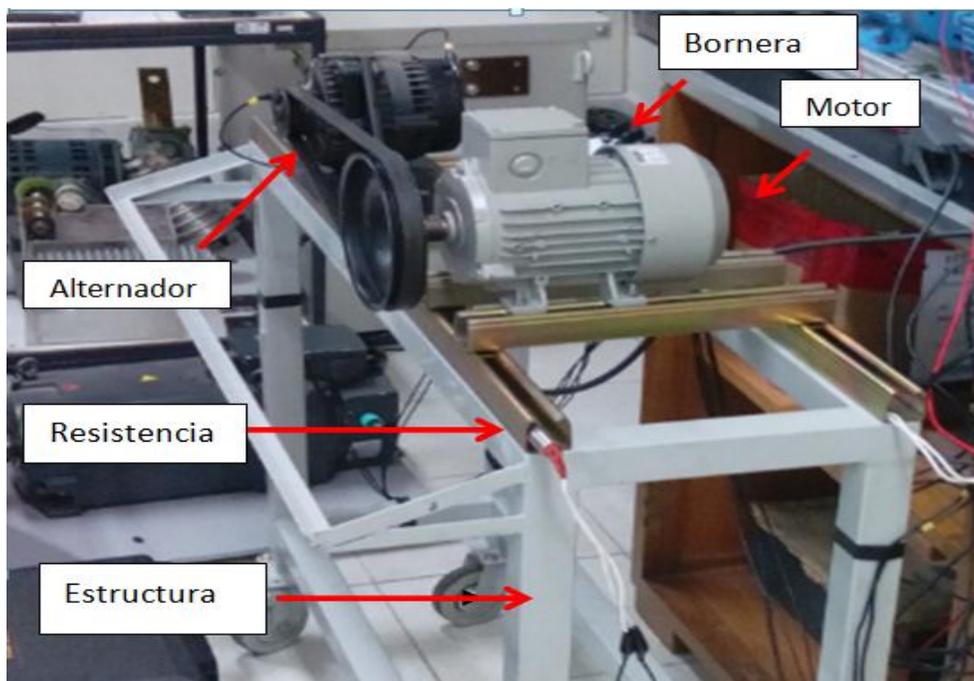


Figura 9. Foto tomada a la plata implementada para el desarrollo del proyecto. (Elaboracion propia, 2016).

4.1.1 PRUEBA # 1 CARACTERIZACION DEL ALTERNADOR (PERDIDAS EN LA CARGA)

La carga del motor estará representada por las pérdidas del alternador más el consumo energético de las resistencias. Se encontró que al conectar la resistencia de 1.9Ω se obtenía la máxima carga para el motor, al conectar la resistencia de 1Ω el variador activa sus protecciones en vista de que se supera el valor límite de operación. Para facilitar la medición de potencias a diferentes velocidades y frecuencias se empleó un motor de DC el cual se encuentra disponible en el laboratorio de máquinas eléctricas. El sistema empleado se muestra en la figura 13.

Listado de equipos:

- Motor DC marca DE LORENZO REF DL 1023
- Módulo de alimentación marca DE LORENZO REF DL1013M2
- Alternador
- Cargas del alternador (cargas resistivas de 6.9Ω , 3.7Ω , y 1.9Ω)
- Tacómetro digital
- Multímetro digital
- Pinzas de corriente

Para la realización de esta prueba se utiliza un motor de corriente continua de excitación compuesta marca DE LORENZO; el motor de DC facilita la medición de potencia requerida para mover el alternador bajo cargas específicas. Las mediciones de potencia realizadas en esta etapa serán utilizadas más adelante cuando se esté trabajando con el motor de AC como fuerza motriz para mover el alternador, esto es; se tendrá caracterizado la potencia requerida para diferentes cargas y velocidades. Este dato es fundamental para determinar la eficiencia del sistema variador + motor + carga a diferentes velocidades y diferentes cargas.

Se requiere variar la velocidad en rangos similares a los obtenidos en las pruebas 1, esto permite calcular las pérdidas en la carga, para ello se toman 4 velocidades; 1800rpm 100%, 1350rpm 75% 900rpm 50% 450rpm 25%.

Se utilizan para esta prueba los equipos mencionados a continuación:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

MOTOR DE CORRIENTE CONTINÚA CON EXCITACIÓN COMPUESTA DL 1023 MARCA DE LORENZO.

Este motor está disponible en el laboratorio de máquinas eléctricas del I.T.M sede robledo.



MAQUINAS ELECTRICAS – UNILAB – 1 kW



MAQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA CON EXCITACION COMPUESTA

DL 1023

Posibilidad de funcionamiento también como generador.



Características técnicas:

- Potencia: 1.1 kW
- Voltaje: 220 V
- Velocidad: 3600 rpm
- Excitación: 180 V / 0.27 A

Accesorios:

- DL 1017RHD REOSTATO DE ARRANQUE
- DL 1017RHE REOSTATO DE EXCITACION

Figura 10. Motor de corriente continua con excitación compuesta. (Lorenzo, DE LORENZO ENGINEERING TRAINING SOLUTIONS, 2002)

Para las conexiones eléctricas se utiliza el módulo DE LORENZO DL 1013M2 el cual se ilustra en las figuras 11 y 12, este se encuentra disponible en el laboratorio de máquinas eléctricas del I.T.M sede robledo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



MAQUINAS ELECTRICAS – UNILAB – 1 kW



MODULOS DE ALIMENTACION

Adecuados para el suministro en corriente alterna, fija y variable, y en corriente continua, rectificada, fija y variable, para efectuar fácilmente todas las pruebas sobre máquinas eléctricas del laboratorio UNILAB y, en general, en un laboratorio de medidas eléctricas. Completos de pulsante de marcha con teleruptor, pulsante de parada, pulsante de emergencia de forma de hongo con desbloqueo con llave y protección magnetotérmica diferencial en las tomas de voltaje de red.

Conector para la protección de máxima velocidad de rotación de los motores y protección térmica. El panel frontal reporta los dispositivos de comando y los bornes de conexión, de norma CEI, claramente interconectados mediante un sinóptico reportado en serigrafía.

DL 1013M2

Voltajes de salida:

CA variable 3x0-430 V, 5 A / 3x0-240 V, 8 A

CA fija 3x380 V + N, 16 A / 3x220 V, 8 A

CA estandar fija 220 V, 10 A

CC variable 0-240 V, 10 A / 0-225 V, 1 A

CC fija 220 V, 10 A

Alimentación 3x380 V + N, 50/60 Hz

DL 1013M3

Voltajes de salidas:

CA variable 3x0-440 V, 4.5 A / 3x0-240 V, 8 A

CA fija 3x380 V, 4.5 A / 3x220 V + N, 16 A

CA estandar fija 127 or 220 V, 10 A

CC variable 0-240 V, 10 A / 0-225 V, 1 A

CC fija 220 V, 10 A

Alimentación 3x220 V + N, 50/60 Hz

Figura 11. Características módulo de alimentación DE LORENZO DL1013M2 (Lorenzo, DE LORENZO ENGINEERING TRAINING SOLUTIONS, 2002)



Figura 12. Módulo de alimentación DE LORENZO DL 1013M2. (Lorenzo, DE LORENZO ENGINEERING TRAINING SOLUTIONS, 2002)

Los valores registrados en las siguientes tablas son medidos con multímetros y amperímetros marca FLUKE disponibles en el laboratorio de máquinas eléctricas.

A continuación, se relacionan los valores medidos:

R_i = Resistencia del inducido según norma.

I_i = Corriente del inducido.

V_i = Tensión del inducido..

R_{ex} = Resistencia de la bobina de excitación.

I_{ex} = Corriente de excitación.

V_{ex} = Tensión de excitación.

rpm_{motor} = Velocidad real del motor.

R_{ca} = Resistencia de carga en el alternador.

I_{ca} = Corriente en la carga del alternador.

V_{ca} = Tensión en la carga del alternador.

Los siguientes valores son el resultado del cálculo matemático aplicando formulas conocidas.

P_i = Perdidas en el inducido motor DC: Se obtiene a partir de la resistencia del inducido y la corriente del inducido.

$$P_i = R_i * I_i^2 \text{ (ecuación 13)}$$

P_m = potencia en el motor: Se obtiene a partir de la corriente del inducido y la tensión del inducido.

$$P_m = I_i * V_i \text{ (ecuación 14)}$$

P_a = Potencia a partir del alternador: Se obtiene a partir de la potencia en el inducido y la potencia absorbida por el motor. Tanto al alternador como el motor DC se les realiza un mantenimiento por lo cual las perdidas por rozamiento son despreciables motivo por el cual no son consideradas.

$$P_a = P_m - P_i \text{ (ecuación 15)}$$

P_{a1} = Perdidas en el alternador: Se obtiene de la potencia a partir del alternador (P_a) y la potencia en la carga del alternador (P_{ca}).

$$P_{a1} = P_a - P_{ca} \text{ (ecuación 16)}$$

P_{ca} = Perdidas en la carga del alternador (resistencias): Se obtiene a partir del voltaje y la corriente en la carga del alternador (cargas resistivas).

$$P_{ca} = V_{ca} * I_{ca} \text{ (ecuación 17)}$$

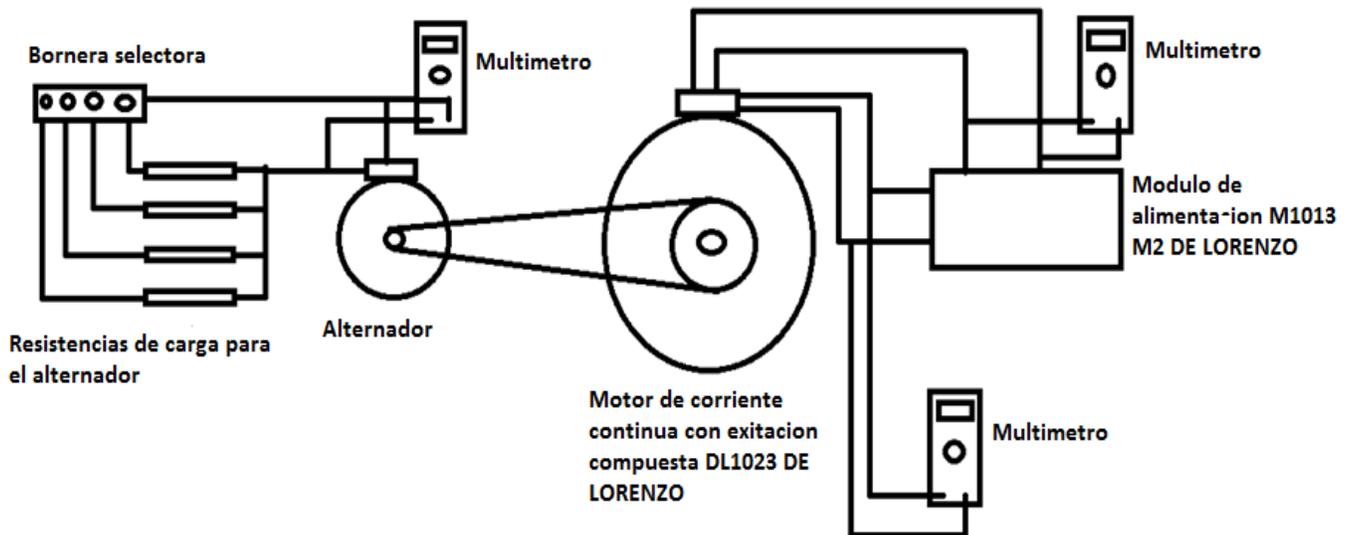
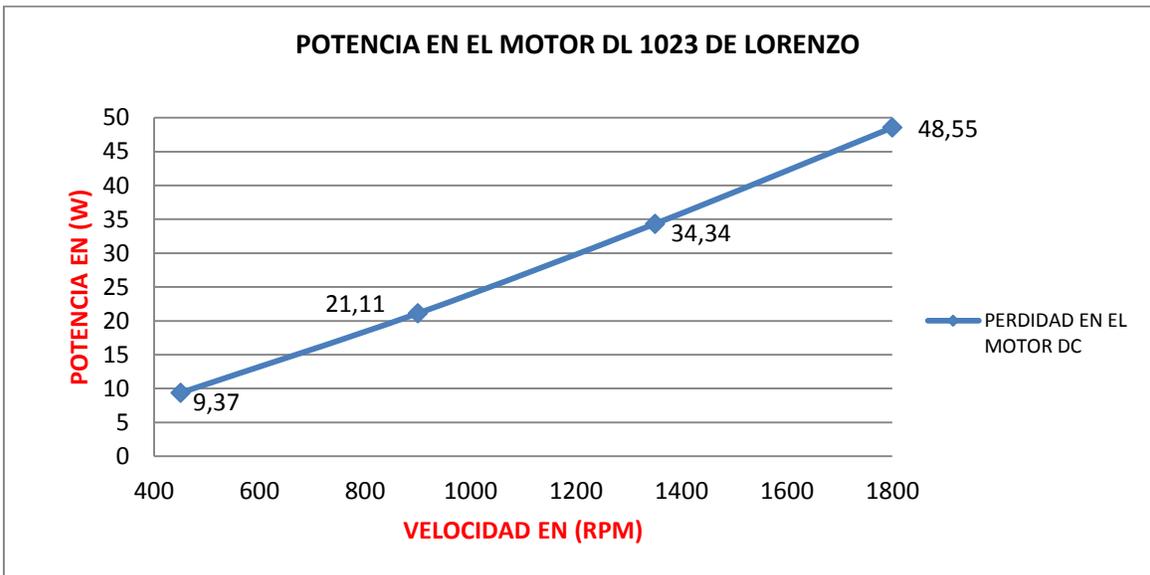


Figura 13. Diseño de la estructura implementa con motor DC DL1023 y módulo de alimentación M1013 M2 ambos de marca DE LORENZO. (Elaboracion propia, 2016)

4.1.2 PRUEBA DE VACIO MOTOR DC DE LORENZO

R_i	I_i	V_i	P_i	P_m	P_a	P_{a1}	R_{ex}	I_{ex}	V_{ex}	rpm	R_{ca}	I_{ca}	V_{ca}	P_{ca}
Ω	AMP	V	W	W	W	W	Ω	AMP	V	RPM	Ω	AMP	V	W
2,6	0,458	106	0,55	48,55	0	0	586	0,27	160	1800	Vacío	0	0	0
2,6	0,426	80,6	0,47	34,34	0	0	586	0,27	160	1350	Vacío	0	0	0
2,6	0,391	54	0,4	21,11	0	0	586	0,27	160	900	Vacío	0	0	0
2,6	0,337	27,8	0,3	9,37	0	0	586	0,27	160	450	Vacío	0	0	0

Tabla 1: Valores medidos prueba de vacío motor DC DE LORENZO. (Elaboracion propia, 2016)



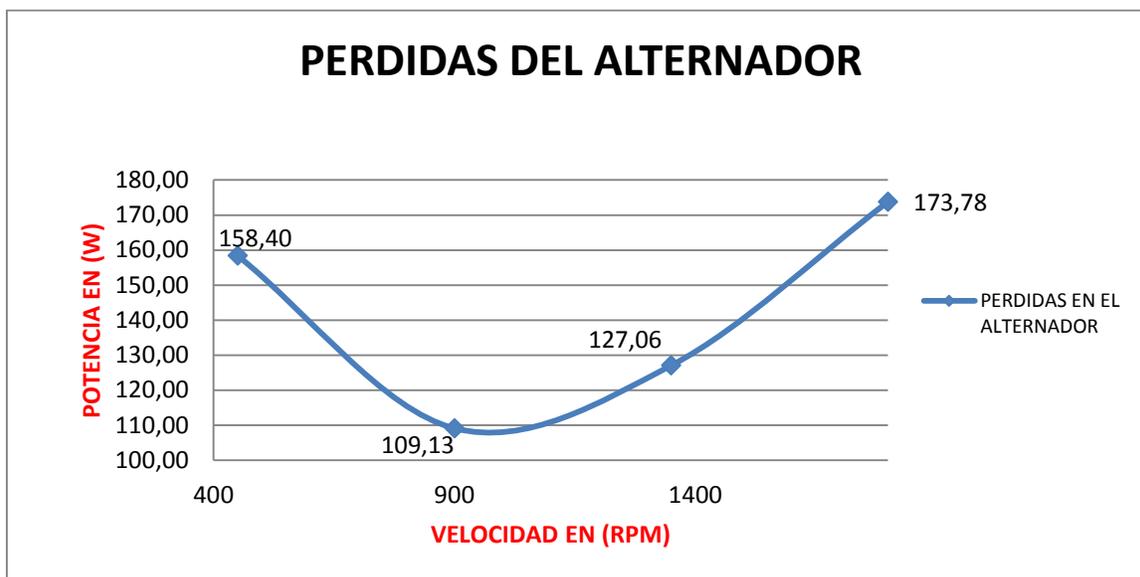
Grafica 1. Prueba de vacío motor DC DE LORENZO. Potencia Vs Velocidad. (Elaboracion propia, 2016)

Se aprecia un comportamiento lineal de la potencia consumida por el motor DC cuando no hay cargas asociadas al mismo (motor en vacío).

4.1.3 PRUEBA DE VACÍO MOTOR DC + ALTERNADOR SIN CARGA

R_i	I_i	V_i	P_i	P_m	P_a	P_{a1}	R_{ex}	I_{ex}	V_{ex}	rpm	R_{ca}	I_{ca}	V_{ca}	P_{ca}
Ω	AMP	V	W	W	W	W	Ω	AMP	V	RPM	Ω	AMP	V	W
2,6	1,66	109	7,16	180,94	173,78	173,78	586	0,27	160	1800	Vacío	0	0	0
2,6	1,68	80	7,34	134,40	127,06	127,06	586	0,27	160	1350	Vacío	0	0	0
2,6	2,04	58,8	10,82	119,95	109,13	109,13	586	0,27	160	900	Vacío	0	0	0
2,6	6	42	93,60	252	158,40	158,40	586	0,27	160	450	Vacío	0	0	0

Tabla 2. Valores medidos prueba de vacío motor DC + alternador sin carga. (Elaboracion propia, 2016)



Gráfica 2. Perdidas a partir del alternador en vacío. (Elaboracion propia, 2016)

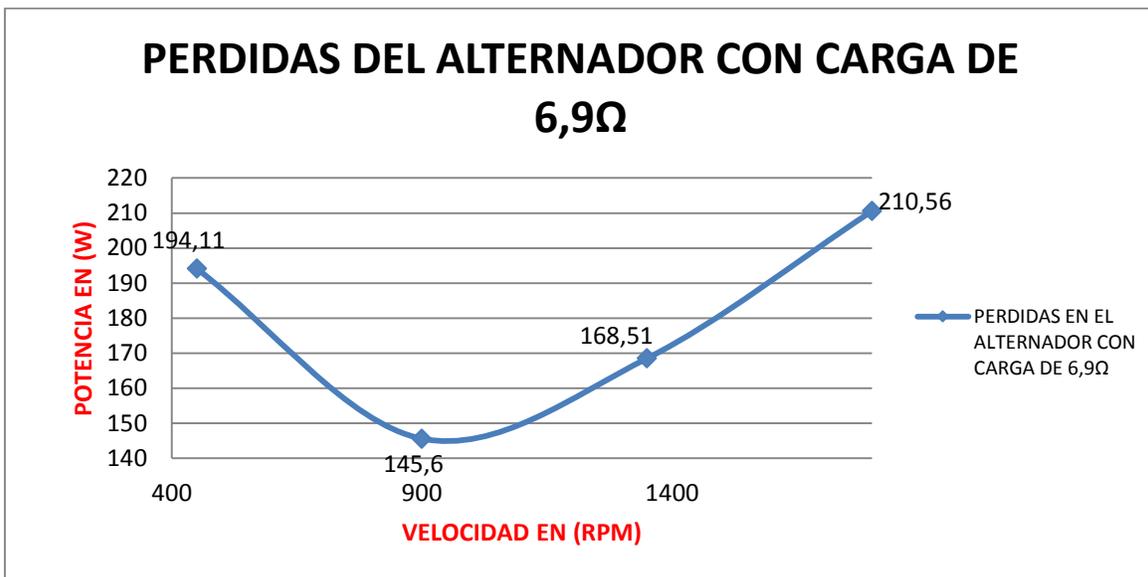
Con el alternador acoplado mecánicamente al motor se observa un comportamiento no lineal en toda la trayectoria. El comportamiento es lineal en velocidades comprendidas entre 1000 y 1800. Entre 400 y 800 rpm también es lineal, pero de pendiente negativa. Este comportamiento grafico se mantiene para las cargas resistivas asociadas al alternador y que se ilustran en las tablas y graficas siguientes. Se puede decir que el alternador es más eficiente a velocidades intermedias, pero para efectos de este proyecto se hará uso de la gráfica para asignar la carga al motor de acuerdo al valor de las resistencias.

Cuando el alternador esta excitado, pero funcionando en vacío, la potencia absorbida responde a la suma de las perdidas mecánicas y en el hierro del paquete magnético del inducido. El consumo de corriente del alternador aun trabajando en vacío es alto para garantizar su correcto funcionamiento, lo que se manifiesta en un consumo importante de potencia (pérdidas). (Cherta, 2004) (INDIEL, 2005)

4.1.4 PRUEBA MOTOR DC + ALTERNADOR CON CARGA (CARGA RESISTIVA 6.9Ω 20W)

R_i	I_i	V_i	P_i	P_m	P_a	P_{a1}	R_{ex}	I_{ex}	V_{ex}	rpm	R_{ca}	I_{ca}	V_{ca}	P_{ca}
Ω	AMP	V	W	W	W	W	Ω	AMP	V	RPM	Ω	AMP	V	W
2,6	2,03	109	10,71	221,27	210,56	182,44	586	0,27	160	1800	6,9Ω	1,9	14,8	28,12
2,6	2,12	85	11,69	180,20	168,51	141,13	586	0,27	160	1350	6,9Ω	1,85	14,8	27,38
2,6	2,69	61,12	18,81	164,41	145,60	118,96	586	0,27	160	900	6,9Ω	1,8	14,8	26,64
2,6	7,1	45,8	131,07	325,18	194,11	170,24	586	0,27	160	450	6,9Ω	1,73	13,8	23,87

Tabla 3. Valores medidos prueba de motor DC + alternador con carga (carga resistiva 6.9Ω 20W). (Elaboracion propia, 2016)



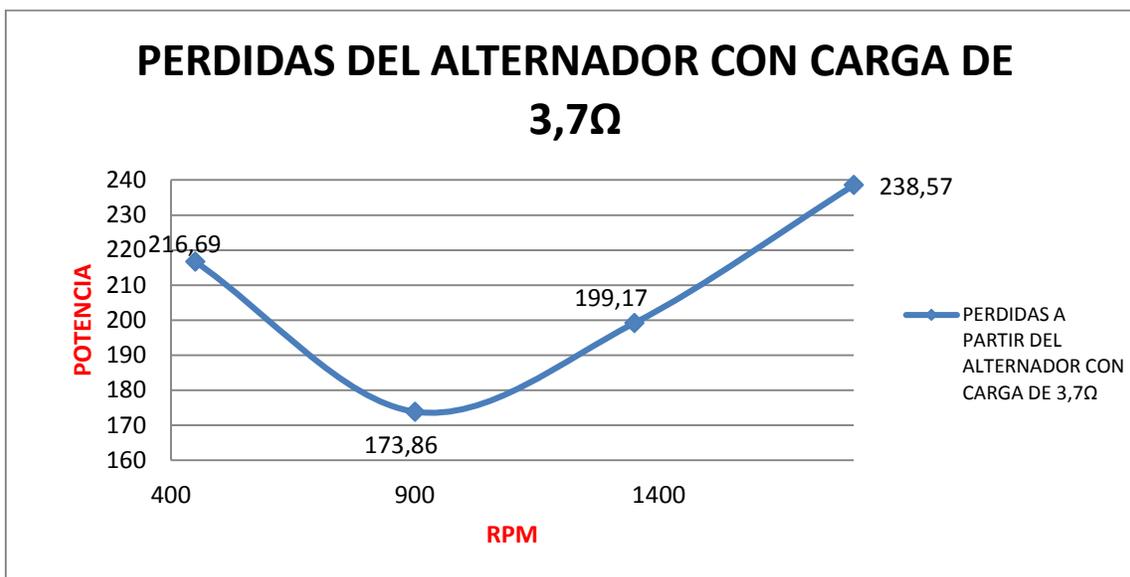
Grafica 3. Perdas del alternador con una carga resistiva de 6,9Ω. (Elaboracion propia, 2016)

En la gráfica 3 se aprecian las perdidas en el alternador cuando se coloca una carga resistiva de 6.9Ω, se puede apreciar un aumento de las perdidas si comparamos estas con las obtenidas en la gráfica, 12, lo cual es un comportamiento normal debido a que la resistencia genera unas pérdidas adicionales las cuales deben ser tenidas en cuenta al momento de determinar la eficiencia del motor a diferentes velocidades y diferentes cargas.

4.1.5 PRUEBA MOTOR DC + ALTERNADOR CON CARGA (ALTERNADOR + RESISTENCIA DE 3.7Ω 30W)

R_i	I_i	V_i	P_i	P_m	P_a	P_{a1}	R_{ex}	I_{ex}	V_{ex}	rpm	R_{ca}	I_{ca}	V_{ca}	P_{ca}
Ω	AMP	V	W	W	W	W	Ω	AMP	V	RPM	Ω	AMP	V	W
2,6	2,27	119	10,71	251,97	238,57	185,65	586	0,27	160	1800	3,7Ω	3,69	14,7	52,92
2,6	2,53	85,3	11,69	215,81	199,17	147,42	586	0,27	160	1350	3,7Ω	3,52	14,7	51,74
2,6	3,29	61,4	18,81	202,01	173,86	122,41	586	0,27	160	900	3,7Ω	3,5	14,7	51,45
2,6	7,91	47,96	131,07	379,36	216,69	174,45	586	0,27	160	450	3,7Ω	3,2	13,2	42,24

Tabla 4. Valores medidos prueba de motor DC + alternador con carga (carga resistiva 3,7Ω). (Elaboracion propia, 2016)



Grafica 4. Perdidas del alternador con carga (carga resistiva de $3,7\Omega$). (Elaboracion propia, 2016)

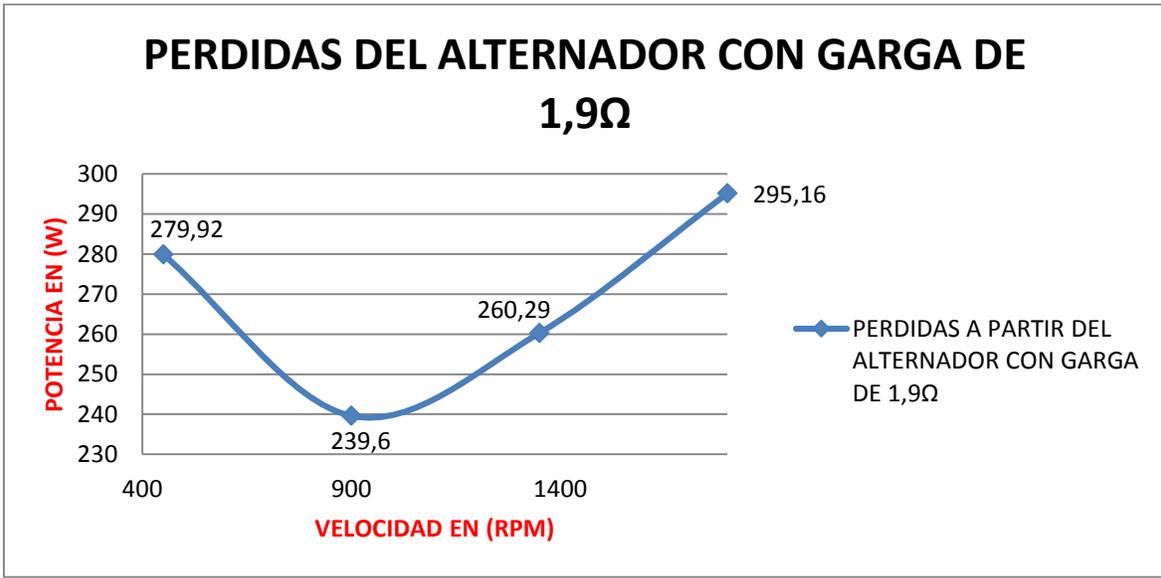
La curva de potencia para estas pérdidas mantiene la tendencia, es decir las pérdidas aumentan cuando se varía la carga resistiva colocada en el alternador cuyo valor para esta prueba es de 3.7Ω 30W.

El comportamiento del alternador seleccionado es similar en todas las gráficas anteriores variando únicamente las pérdidas en potencia según la carga resistiva conectada al sistema. La curva característica de las pérdidas para el alternador conserva siempre la misma forma independiente de las cargas resistivas conectadas a este equipo, esto facilitará el cálculo de la eficiencia del motor trifásico trabajando con o sin variador de velocidad.

4.1.6 PRUEBA MOTOR DC + ALTERNADOR CON CARGA (ALTERNADOR + RESISTENCIA DE 1.9Ω 60W)

R_i	I_i	V_i	P_i	P_m	P_a	P_{a1}	R_{ex}	I_{ex}	V_{ex}	rpm	R_{ca}	I_{ca}	V_{ca}	P_{ca}
Ω	AMP	V	W	W	W	W	Ω	AMP	V	RPM	Ω	AMP	V	W
2,6	2,82	112	20,68	315,16	200,26	185,65	586	0,27	160	1800	$1,9\Omega$	6,5	14,6	94,90
2,6	3,27	88,1	27,80	288,09	260,29	147,42	586	0,27	160	1350	$1,9\Omega$	6,5	14,7	95,55
2,6	4,42	65,7	50,79	290,39	239,60	122,41	586	0,27	160	900	$1,9\Omega$	6,73	14,6	98,26
2,6	9,96	54	257,92	537,84	279,92	174,45	586	0,27	160	450	$1,9\Omega$	6,04	13,1	79,12

Tabla 5. Valores medidos prueba de motor DC + alternador con carga (carga resistiva 1.9Ω). (Elaboracion propia, 2016)



Grafica 5. Perdidas del alternador con carga (carga resistiva de 1,9Ω). (Elaboracion propia, 2016)

La grafica 5 ilustra las perdidas con la resistencia que disipa mayor potencia en el alternador (1,9Ω 60W), conservando siempre la misma tendencia que las gráficas anteriores lo cual facilita la consecución de los objetivos planteados para la obtención de la eficiencia del motor.

4.2 PRUEBA # 2 SELECCIÓN DEL EQUIPO DE MEDIDA CON MEJORES PRESTACIONES PARA LA ADQUISICIÓN DE LOS DATOS EN EL VARIADOR.

Determinación del mejor equipo de medida y de mayores prestaciones a utilizar para una medición de potencia trifásica a la salida del variador de velocidad.

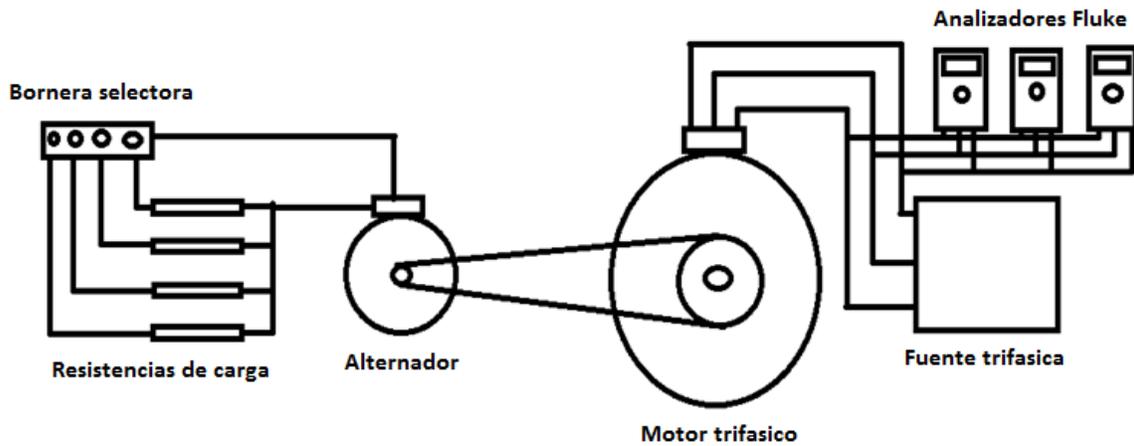


Figura 14. Diseño de la estructura implementa con la fuente trifásica. (Elaboracion propia, 2016)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Por recomendación del fabricante se utiliza como instrumento patrón o de referencia el analizador de redes FLUKE 435, por sus prestaciones y características.

Se conectan de la red eléctrica el motor con su carga respectiva y se realiza la medición de la potencia eléctrica en los tres medidores FLUKE 43B, FLUKE 199C y FLUKE 435, si los instrumentos están bien configurados los datos deben ser los mismos o estar muy cercanos o aproximados.

Se evalúan los resultados de la medición y se selecciona uno de los dos equipos FLUKE 43B o FLUKE 199C de acuerdo a sus prestaciones y características.

4.2.1 Medición del sistema motor + alternador alimentados directamente de la red eléctrica 60HZ

V(L1-N)	V(L2-N)	V(L3-N)	V(TOTAL)	I (L1-N)	I (L2-N)(a)	I (L3-N)	I(TOTAL)	INTRUMENTO
Voltios (v)	Voltios (v)	Voltios (v)	Voltios (v)	Corriente (AMP)	Corriente (AMP)	Corriente (AMP)	Corriente (AMP)	REF.
123,33	123,5	123,39	213,74	1,154	1,131	1,12	1,135	FLUKE435
123	124	123,3	213,78	1,1	1	1	1,03	FLUKE199C
123	123,6	123,4	213,61	1,05	1,02	1,01	1,03	FLUKE43B
P (L1)	P (L2)	P (L3)	P(TOTAL)	F.P	THD	HZ	RPM	INSTRUMENTO
Potencia (w)	Potencia (w)	Potencia (w)	Potencia (w)	Factor de potencia (%)	%	Frecuencia (HZ)	Velocidad (rpm)	REF.
59,9	57	59,1	176	0,42	6,20	59,997	1751	FLUKE435
60	60	60	180	0,54		60	1751	FLUKE199C
60	60	60	180	0,46	5,80	59,9	1751	FLUKE43B

Tabla 6 Prueba motor + alternador alimentado de la red eléctrica a 60Hz. (Elaboracion propia, 2016)

Se determina con esta prueba que los tres medidores entregan datos de similares cuya diferencia es despreciable.

El fabricante recomienda el uso del analizador FLUKE 435 para medir la potencia trifásica a la entrada del variador MICROMASTER 440 ya que dicho equipo está diseñado para medir directamente en la red eléctrica a 60HZ, y los medidores FLUKE 43B y FLUKE199C para medir potencia a la salida del variador, ambos disponen de un filtro pasa bajos que elimina las altas frecuencias generado por los transistores de potencia IGBT, garantizando así unas mediciones más precisas.

Se selecciona el analizador FLUKE 199C para las mediciones en el variador por sus características y prestaciones.

4.3 PRUEBA # 3 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA

Listado de equipos:

- Analizador FLUKE 435 (para medir la potencia trifásica en la entrada del sistema, entrada del variador).
- Analizador FLUKE 199C (para medir la potencia que entrega el variador y entra al motor).
- Variador MICROMASTER 440.
- Motor trifásico de inducción marca SIEMENS REF 1LA7 070-4YC60 0.4HP 1.6AMP.
- Alternador (se utiliza como carga del motor en conjunto con las resistencias siguientes)
- Cargas del alternador (cargas resistivas de $6,9\Omega$ 20W, $3,7\Omega$ 30W, $1,9\Omega$ 60W) (para aumentar gradualmente la carga en el motor).
- Tacómetro digital (para medir la velocidad en el eje del motor).

Con los resultados obtenidos en esta prueba se cumple con el objetivo específico # 2 en el cual se pretende determinar la eficiencia de un sistema variador-motor a diferentes velocidades y diferentes cargas.

Nota: en esta prueba se tomarán los datos en tres velocidades (1721, 1350, y 900rpm) debido a que hay un aumento considerable de la potencia cuando se lleva el motor a velocidades menores a 900 rpm lo cual sobrecarga el motor y dispara las protecciones del variador.

Se inicia la prueba con el sistema variador + motor + alternador sin cargas resistivas:

4.3.1 MEDICIÓN # 1 SISTEMA VARIADOR + MOTOR + CARGA (ALTERNADOR EN VACIO)

ENTRADA VARIADOR, MEDICION CON ANALIZADOR FLUKE 435

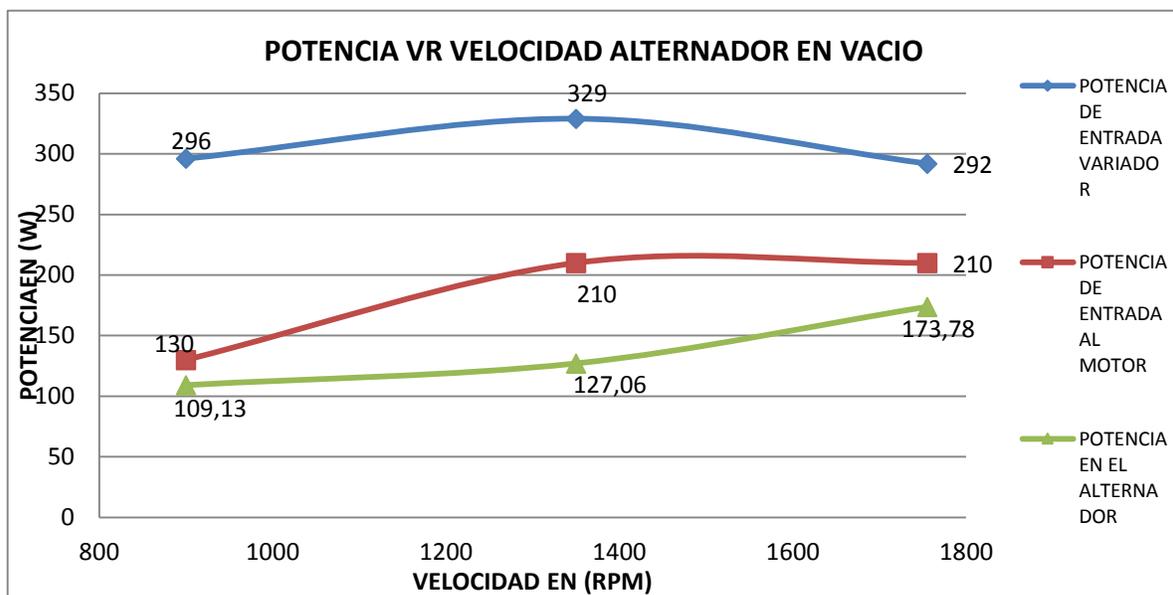
FRECUENCIA (HZ)	VELOCIDAD (RPM)	TENSION (V)	CORRIENTE (AMP)	POTENCIA (W)	FACTOR DE POTENCIA F.P (%)	POTENCIA Pa (W)	EFICIENCIA (η)
60	1721	217	1,22	292	0,61	173,78	0,595
60	1350	217	1,2	329	0,27	127,06	0,386
60	900	217	1,16	296	0,24	109,13	0,368

Tabla 7. Medición a la entrada del variador Alternador en vacío. (Elaboracion propia, 2016)

SALIDA DEL VARIADOR, MEDICION CON ANALIZADOR FLUKE 199C

FRECUENCIA (HZ)	VELOCIDAD (RPM)	TENSION (V)	CORRIENTE (I)	POTENCIA (W)	FACTOR DE POTENCIA F.P (%)	POTENCIA Pa (W)	EFICIENCIA (η)
60	1721	217	1,17	210	0,85	173,78	0,827
47	1350	189	0,52	210	0,84	127,06	0,605
32	900	133	131	130	0,74	109,13	0,839

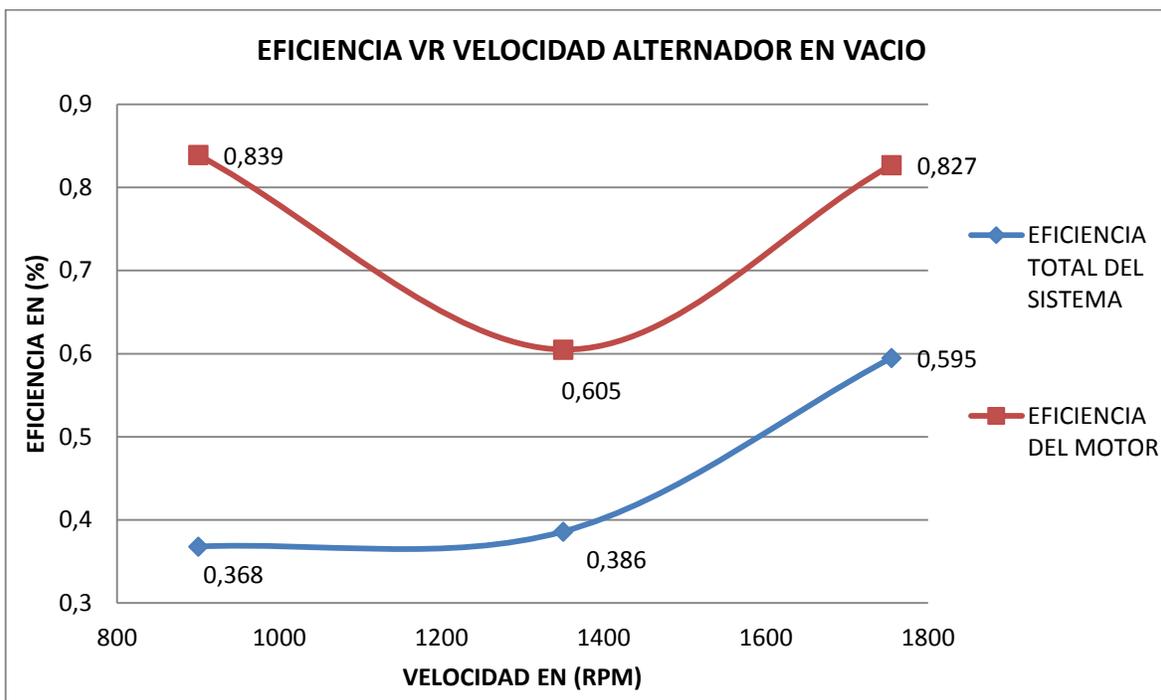
Tabla 8. Medición a la salida del variador Alternador en vacío. (Elaboracion propia, 2016)



Grafica 6. Potencias medidas con carga (alternador en vacío). (Elaboracion propia, 2016)

El color azul representa la potencia suministrada por la red, el rojo representa la potencia suministrada al motor por medio del variador, el color verde representa la potencia o las pérdidas en el alternador y en las cargas asociadas a dicho alternador.

La diferencia entre azul y rojo corresponde a la potencia que consume el variador para su funcionamiento y la diferencia entre la roja y la verde corresponde a la potencia disipada en el motor trifásico.



Grafica 7. Eficiencia medida con carga (alternador en vacío). (Elaboracion propia, 2016)

Eficiencia total: El variador está produciendo energía reactiva para poder magnetizar el motor aunque se disipa potencia activa para las pérdidas del motor y del alternador. El variador se queda con parte importante de la energía.

A partir de cierto punto al aumentar la velocidad mejora la eficiencia en ambas partes.

4.3.2 MEDICIÓN # 2 SISTEMA VARIADOR + MOTOR + CARGA (ALTERNADOR + RESISTENCIA DE 6,9Ω 20W)

Con carga resistiva de 6,9Ω 20W

ENTRADA VARIADOR, MEDICION CON ANALIZADOR FLUKE 435

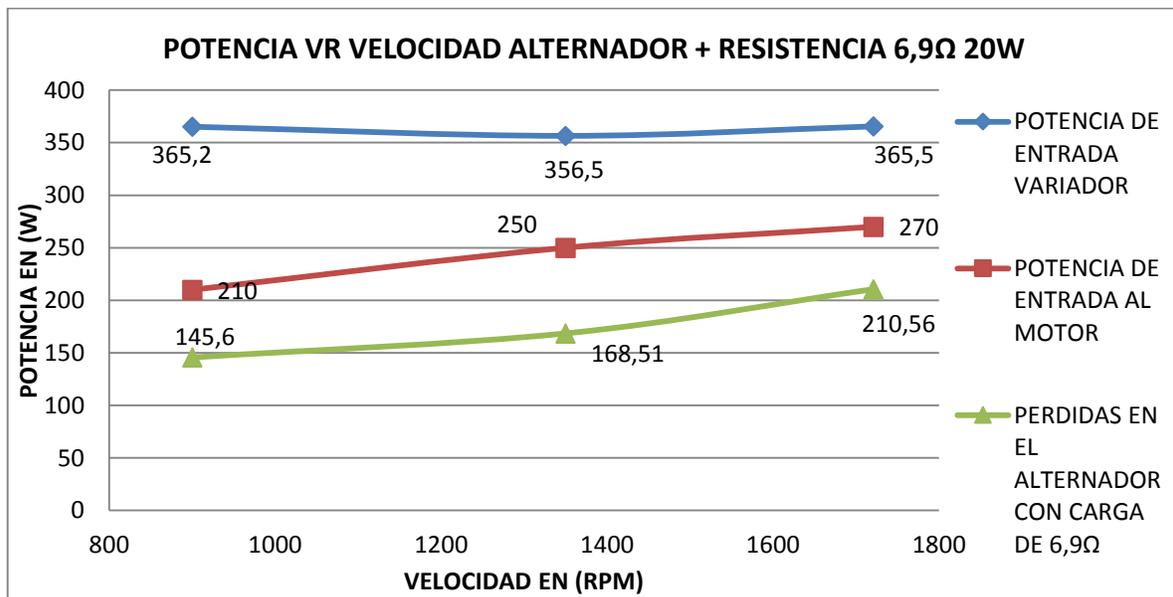
FRECUENCIA (HZ)	VELOCIDAD (RPM)	TENSION (V)	CORRIENTE (AMP)	POTENCIA (W)	FACTOR DE POTENCIA F.P (%)	POTENCIA Pa (W)	EFICIENCIA (η)
60	1721	217	1,31	365,5	0,72	210,56	0,57
60	1350	217	1,31	356,5	0,3	168,51	0,47
60	900	217	1,39	365,2	0,27	145,6	0,39

Tabla 9. Medición a la entrada del variador carga compuesta (alternador+ resistencia 6,9Ω 20W). (Elaboracion propia, 2016)

SALIDA DEL VARIADOR, MEDICION CON ANALIZADOR FLUKE 199C

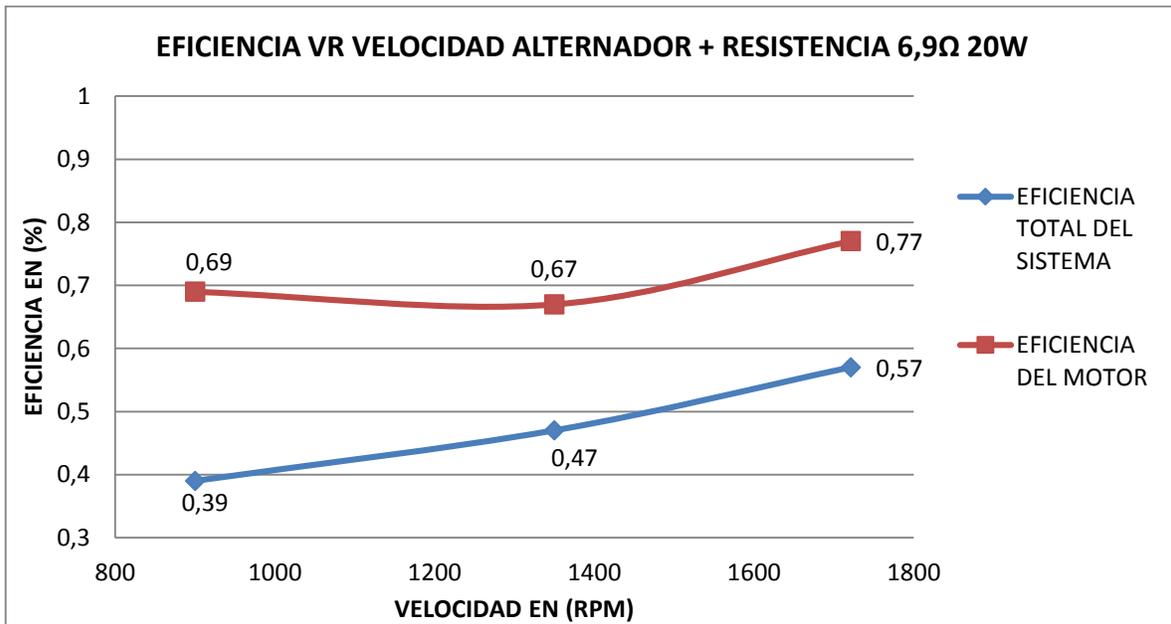
FRECUENCIA (HZ)	VELOCIDAD (RPM)	TENSION (V)	CORRIENTE (AMP)	POTENCIA (W)	FACTOR DE POTENCIA F.P (%)	POTENCIA Pa (W)	EFICIENCIA (η)
60	1721	217	1,19	270	0,81	210,56	0,77
47	1350	188	1,34	250	0,79	168,51	0,67
32	900	133	1,4	210	0,62	145,6	0,69

Tabla 10. Medición a la salida del variador (alternador + resistencia 6,9Ω 20W). (Elaboracion propia, 2016)



Grafica 8. Potencias medidas con carga (alternador + resistencia de 6,9Ω 20W). (Elaboracion propia, 2016)

Se puede observar que el comportamiento de las potencias tiene una trayectoria más lineal.



Grafica 9. Eficiencia medida con carga (alternador + resistencia de 6,9Ω 20W). (Elaboración propia, 2016)

Para mejorar la eficiencia del motor deben disminuir las pérdidas en el mismo, en esta prueba se aumentaron las pérdidas al colocar una carga resistiva al sistema y disminuir la velocidad con lo cual disminuye un poco la eficiencia del motor. La eficiencia total mejoró el comportamiento lineal.

4.3.3 MEDICIÓN # 3 SISTEMA VARIADOR + ALTERNADOR + CARGA (ALTERNADOR + RESISTENCIA DE 3,9Ω 30W)

Con carga resistiva de 3,7Ω 30W

ENTRADA VARIADOR, MEDICION CON ANALIZADOR FLUKE 435

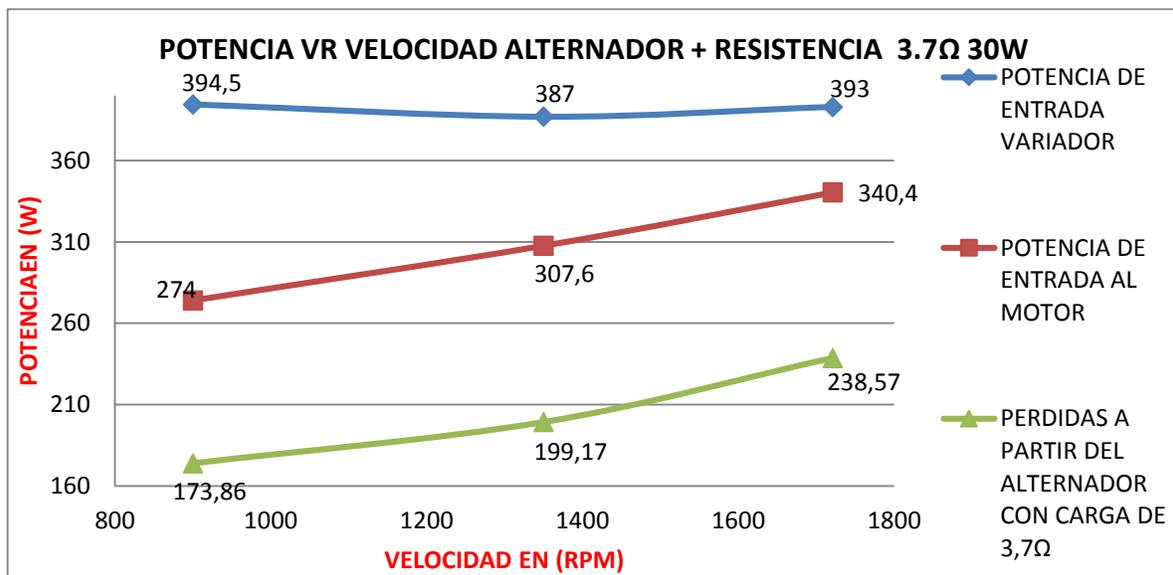
FRECUENCIA (HZ)	VELOCIDAD (RPM)	TENSION (V)	CORRIENTE (AMP)	POTENCIA (W)	FACTOR DE POTENCIA F.P (%)	POTENCIA Pa (W)	EFICIENCIA (η)
60	1721	215	1,67	393	0,43	238,57	0,6
60	1350	215	1,65	387	0,43	199,17	0,51
60	900	215	1,68	394,5	0,43	173,86	0,44

Tabla 11. Medición a la entrada del variador (Con carga resistiva de 3,7Ω 30W). (Elaboración propia, 2016)

SALIDA VARIADOR, MEDICION CON ANALIZADOR FLUKE 199C

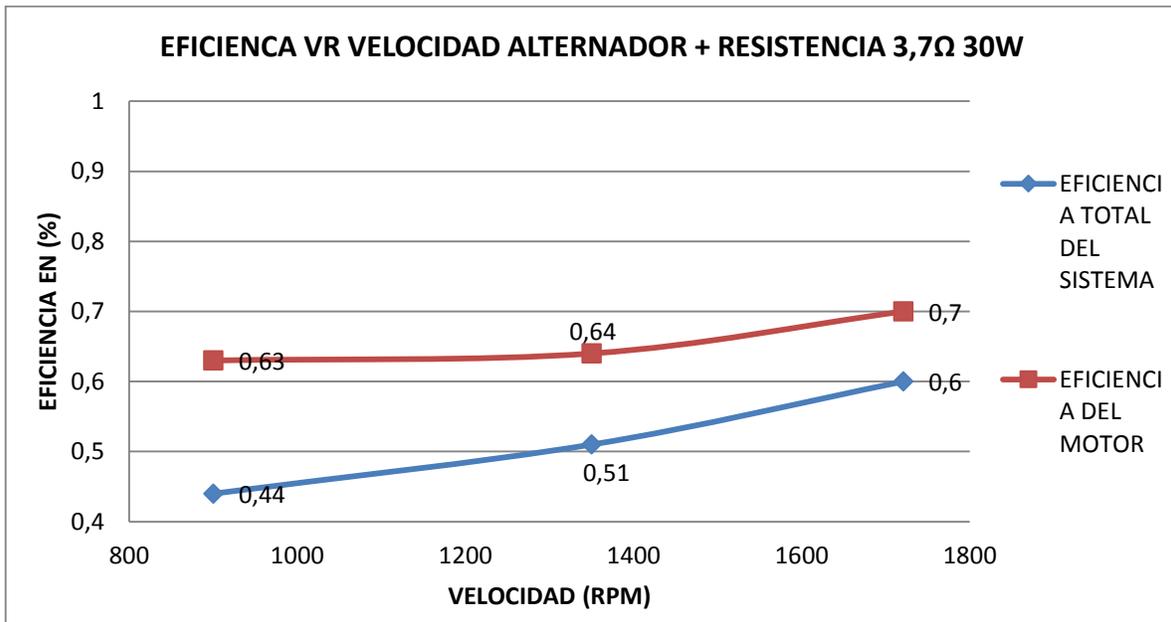
FRECUENCIA (HZ)	VELOCIDAD (RPM)	TENSION (V)	CORRIENTE (AMP)	POTENCIA (W)	FACTOR DE POTENCIA F.P (%)	POTENCIA Pa (W)	EFICIENCIA (η)
60	1721	215	1,25	340,4	0,76	238,57	0,7
48,6	1350	194	1,43	307,6	0,76	199,17	0,64
35	900	140	1,53	274	0,57	173,86	0,63

Tabla 12. Medición a la salida del variador (Con carga resistiva de $3,7\Omega$ 30W). (Elaboración propia, 2016)



Grafica 10. Potencias medidas con carga (alternador + resistencia de $3,7\Omega$ 30W). (Elaboración propia, 2016)

Aumentaron las pérdidas en el variador al aumentar la carga. Mejora la eficiencia del motor para esta condición.



Grafica 11. Eficiencia medida con carga (alternador + resistencia de $3,7\Omega$ 30W). (Elaboración propia, 2016)

4.3.4 MEDICIÓN # 4 SISTEMA VARIADOR + MOTOR + CARGA (ALTERNADOR + RESISTENCIA DE $1,9\Omega$ 60W)

Con carga resistiva de $1,9\Omega$ 60W.

ENTRADA VARIADOR, MEDICION CON ANALIZADOR FLUKE 435

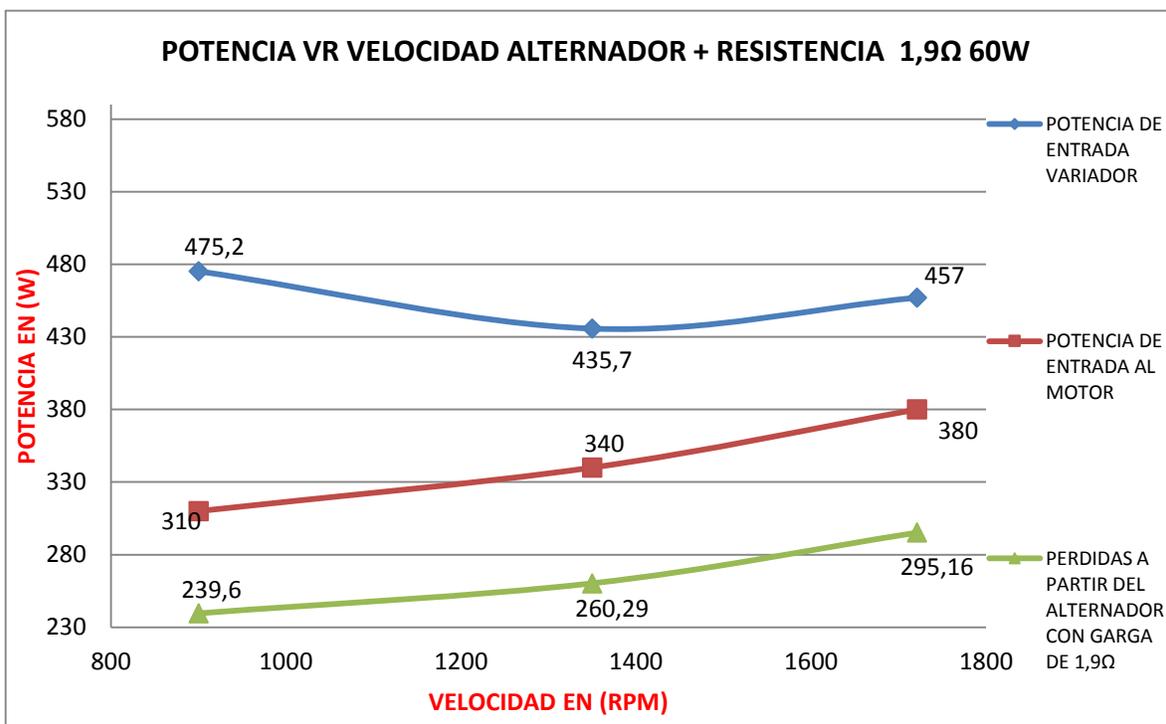
FRECUENCIA (HZ)	VELOCIDAD (RPM)	TENSION (V)	CORRIENTE (AMP)	POTENCIA (W)	FACTOR DE POTENCIA F.P (%)	POTENCIA Pa (W)	EFICIENCIA (η)
60	1721	217	1,92	457	0,38	295,16	0,64
49	1350	217	1,71	435,7	0,33	260,29	0,59
38	900	217	2,15	475,2	0,28	239,6	0,5

Tabla 13. Medición a la entrada del variador (Con carga resistiva de $1,9\Omega$ 60W). (Elaboración propia, 2016)

SALIDA VARIADOR, MEDICION CON ANALIZADOR FLUKE 199C

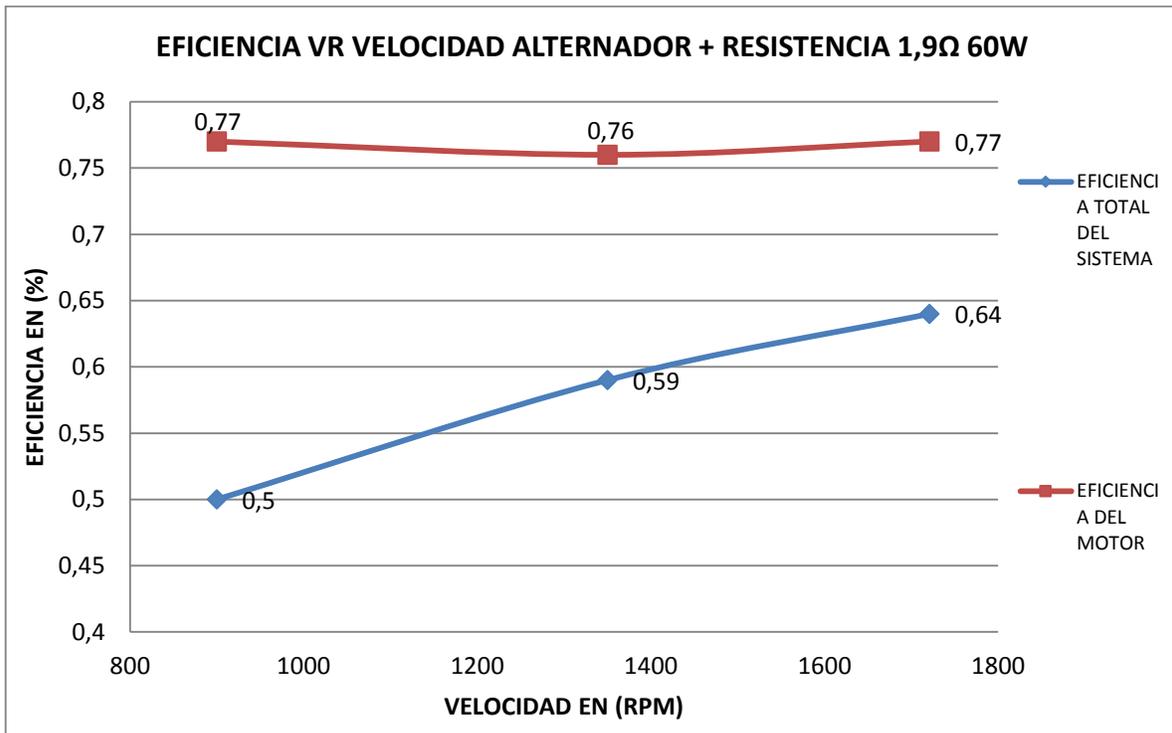
FRECUENCIA (HZ)	VELOCIDAD (RPM)	TENSION (V)	CORRIENTE (AMP)	POTENCIA (W)	FACTOR DE POTENCIA F.P (%)	POTENCIA Pa (W)	EFICIENCIA (η)
60	1721	217	1,37	380	0,69	295,16	0,77
49	1350	193	1,54	340	0,66	260,29	0,7
38	900	152	1,92	310	0,47	239,6	0,77

Tabla 14. Medición a la salida del variador. (Con carga resistiva de $1,9\Omega$ 60W.). (Elaboración propia, 2016)



Gráfica 12. Potencias medidas con carga (alternador + resistencia de $1,9\Omega$ 60W). (Elaboración propia, 2016)

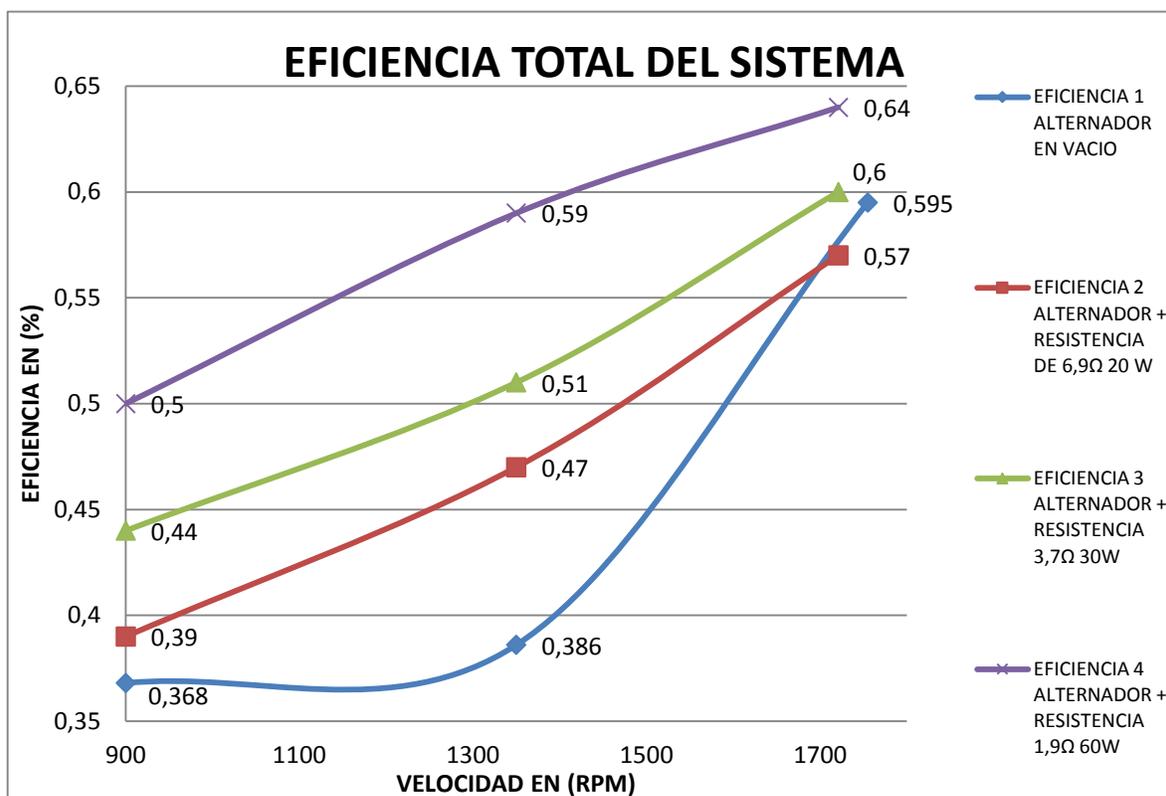
La potencia aumenta al aumentar la carga en el motor, al disminuir la velocidad disminuye también las pérdidas en el motor, pero aumentan en el variador o entrada del sistema.



Gráfica 13. Eficiencia medida con carga (alternador + resistencia de 1,9Ω 60W). (Elaboración propia, 2016)

La eficiencia total del sistema y la del motor mejoraron con la carga que demanda mayor potencia.

4.3.5 EFICIENCIA TOTAL DEL SISTEMA

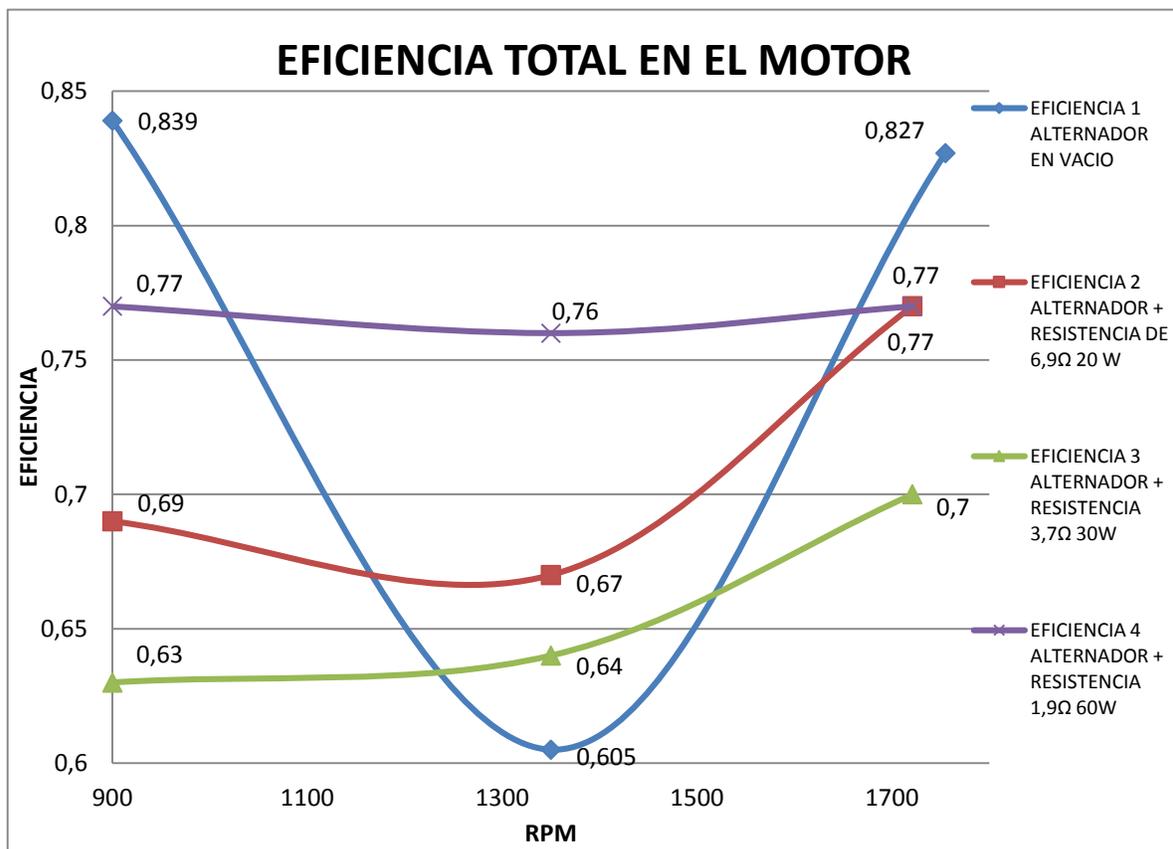


Grafica 14. Eficiencia total del sistema medida a la entrada del variador. (Elaboracion propia, 2016)

La eficiencia total del sistema mejora con la carga de mayor valor y a la velocidad nominal, se observa una disminución de la eficiencia cuando se disminuye la carga en el motor y se reduce la velocidad en el mismo.

Con el alternador operando sin resistencias (alternador en vacío), se puede apreciar una disminución de la eficiencia principalmente a baja velocidad.

4.3.6 EFICIENCIA TOTAL DEL MOTOR



Grafica 15. Eficiencia total del sistema medida en el motor (salida del variador). (Elaboración propia, 2016)

La eficiencia del motor operando con el variador mejora al aumentar la carga hasta el valor nominal. La eficiencia del motor operando con el alternador sin resistencias (alternador en vacío) presenta un comportamiento no lineal.

4.3.7 CALCULO DEL TORQUE O PAR

A continuación, se calcula el torque o par del motor con las potencias obtenidas en la carga y se grafica la eficiencia Vs el torque para las diferentes condiciones de carga y velocidad.

El **par motor** o **torque** es el momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia o, dicho de otro modo, la tendencia de una fuerza para girar un objeto alrededor de un eje, punto de apoyo, o de pivote. La potencia desarrollada por el par motor es proporcional a la velocidad angular del eje de transmisión, viniendo dada por:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$P = M \cdot \omega \text{ (Ecuación 18)}$$

Dónde:

- **P** es la potencia (en **W**)
- **M** es el par motor (en **N.m**)
- **W** es la velocidad angular (en **rad/s**)

Primero se convierten las tres velocidades que se vienen trabajando en rpm a rad/s aplicando la siguiente fórmula:

$$1 \text{ rpm} = 1 \frac{r}{min} = \frac{2\pi \text{ rad}}{60 \text{ s}} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{rad}{s} \approx 0,10471976 \frac{rad}{s}$$

Si se aplica la fórmula quedan las siguientes velocidades:

$$1721 \text{rpm} = 180,22 \text{ rad/s}$$

$$1350 \text{rpm} = 141,37 \text{ rad/s}$$

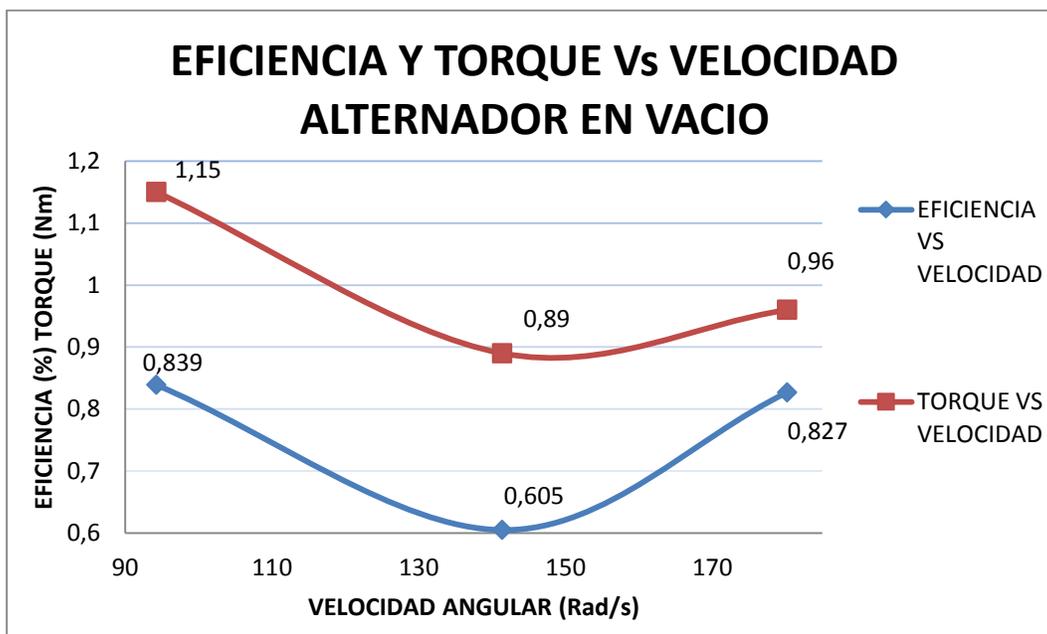
$$900 \text{rpm} = 94,24 \text{ rad/s}$$

Previamente se calculó la potencia en la carga del motor (prueba # 2), aplicando la ecuación # 18 se puede encontrar el torque o par del motor para cada velocidad y para cada carga conectada al motor, los cálculos realizados se registran en las tablas 15, 16, 17 y 18 donde se puede apreciar el par del motor para cada uno de los estados de carga y velocidad.

4.3.8 CALCULO DEL TORQUE SISTEMA MOTOR + ALTERNADOR EN VACIO

VELOCIDAD (rad/s)	TORQUE CALCULADO (Par) (Nm)	POTENCIA Pa (W)	CARGA RESISTIVA (Ω)
180,22	0,96	173,78	∞
141,37	0,89	127,06	∞
94,24	1,15	109,13	∞

Tabla 15. Calculo de torque sistema motor + alternador en vacío. (Elaboracion propia, 2016)



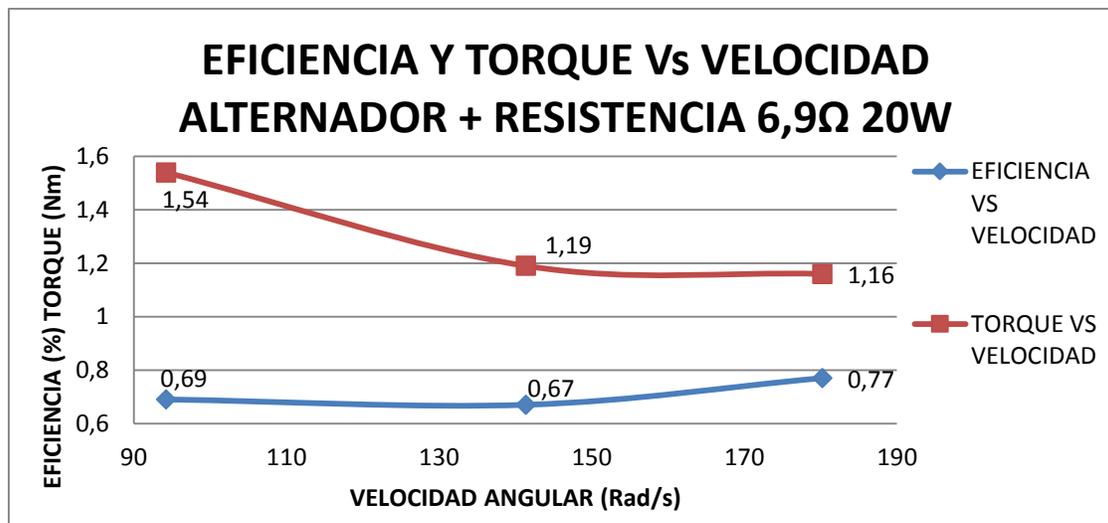
Grafica 16. Eficiencia vs velocidad + alternador en vacío. (Elaboracion propia, 2016)

Con el alternador en vacío como carga para el motor se observa el comportamiento grafico de la eficiencia vs velocidad del motor, lo que sugiere que para cargas bajas la eficiencia no tiene un comportamiento lineal.

4.3.9 CALCULO DEL TORQUE SISTEMA MOTOR+ ALTERNADOR + RESISTENCIA DE 6,9Ω 20W

VELOCIDAD (rad/s)	TORQUE CALCULADO (Par) (NM)	POTENCIA Pa (W)	CARGA RESISTIVA (Ω)
180,22	1,16	210,56	6,9Ω
141,37	1,19	168,51	6,9Ω
94,24	1,54	145,6	6,9Ω

Tabla 16. Calculo de torque sistema motor+ alternador + resistencia de 6,9Ω 20W. (Elaboracion propia, 2016)



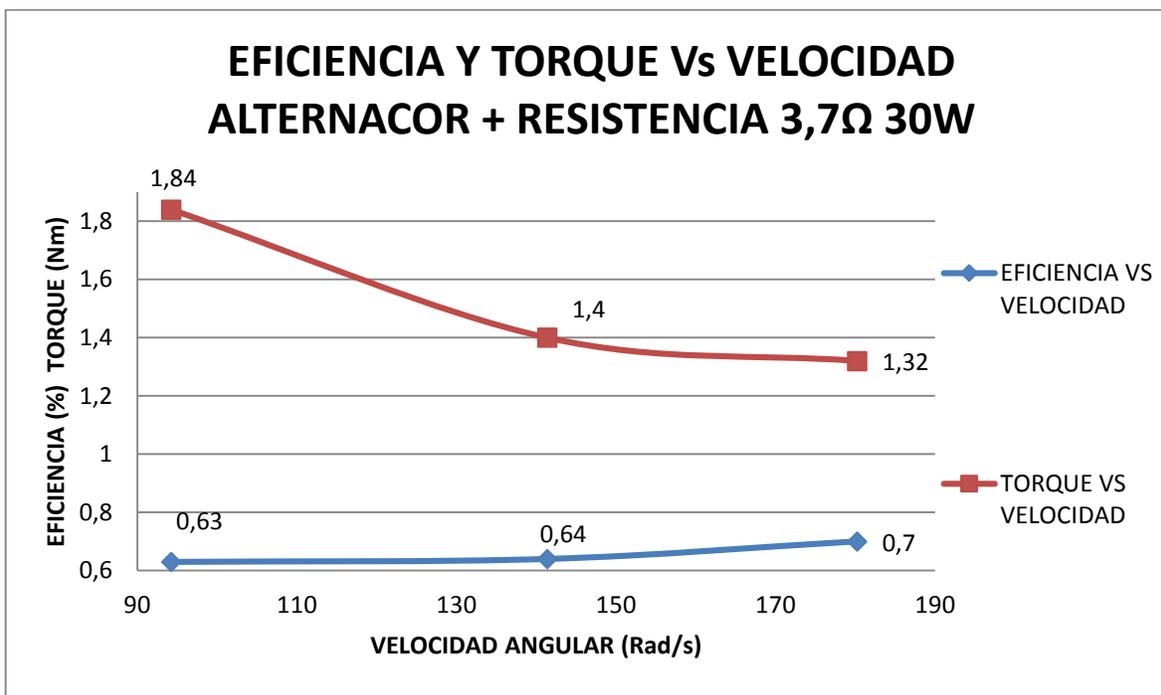
Grafica 17. Eficiencia vs velocidad + alternador + resistencia 6,9Ω 20W. (Elaboracion propia, 2016)

Al aumentar la carga, el comportamiento de la eficiencia en función de la velocidad del motor tiene un comportamiento más lineal. El incremento de la velocidad conduce a que la eficiencia del sistema mejore.

4.3.10 CALCULO DEL TORQUE SISTEMA MOTOR + ALTERNADOR + RESISTENCIA DE 3,7Ω 30 W

VELOCIDAD (rad/s)	TORQUE CALCULADO (Par) (NM)	POTENCIA Pa (W)	CARGA RESISTIVA (Ω)
180,22	1,32	238,57	3,7Ω
141,37	1,4	199,17	3,7Ω
94,24	1,84	173,86	3,7Ω

Tabla 17. Calculo de torque sistema motor + alternador + resistencia 3,7Ω 30W. (Elaboracion propia, 2016)



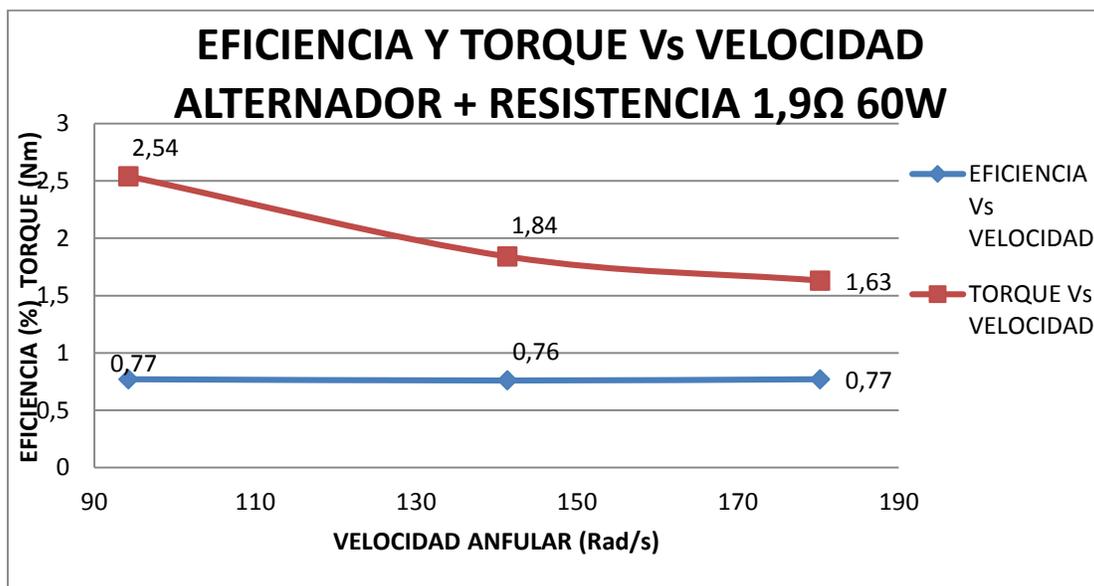
Grafica 18. Eficiencia vs velocidad + alternador + resistencia 3,7Ω 30W. (Elaboracion propia, 2016)

Se observa un comportamiento más lineal, el torque aumenta un poco al aumentar la velocidad angular y la eficiencia mejora a mayor velocidad, cuando se opera el motor a la máxima velocidad disminuye el torque y aumenta la eficiencia.

4.3.11 CALCULO DEL TORQUE SISTEMA MOTOR + ALTERNADOR + RESISTENCIA DE 1,9Ω 60W

VELOCIDAD (rad/s)	TORQUE CALCULADO (Par) (NM)	POTENCIA Pa (W)	CARGA RESISTIVA (Ω)
180,22	1,63	295,16	1,9Ω
141,37	1,84	260,29	1,9Ω
94,24	2,54	239,6	1,9Ω

Tabla 18. Calculo de torque sistema motor + alternador + resistencia de 1,9Ω 60W. (Elaboracion propia, 2016)



Grafica 19. Eficiencia Vs velocidad + alternador + resistencia $1,9\Omega$ 60W. (Elaboracion propia, 2016)

Cuando se opera el motor con su máxima carga, aumenta el torque y mejora la eficiencia del motor, el variador logra mantener una eficiencia cercana en cualquier velocidad ajustada, pero hay un aumento del torque al disminuir la velocidad.

4.4 PRUEBA # 4 DETERMINACION DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR

4.4.1 PARAMETROS PARA MOTOR SIEMENS DE 0.4 HP (300 Watt)

Para realizar las pruebas y tomar los parámetros del motor se tienen en cuenta los datos de placa de la máquina y la ayuda de la norma IEEE 112.

Parámetro	Valor
Voltaje	220Δ/440Y V
Corriente	1.6/0.8 A
Potencia	0.4 HP = 300 Watt
Factor de potencia	$\cos \phi = 0.77$
Velocidad de giro	1640 rpm

Tabla 19. Datos de placa de la máquina de inducción considerada. (Elaboracion propia, 2016)

4.4.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

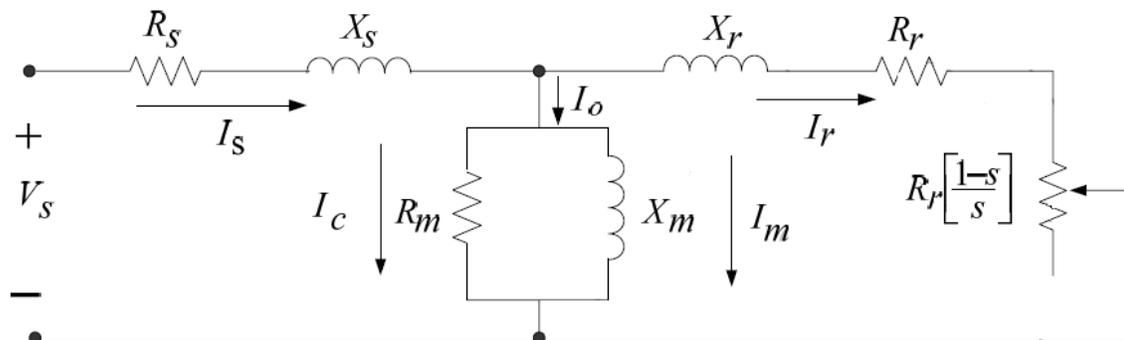


Figura 15. Circuito equivalente del motor. (Chapman, 2005)

Dónde:

R_s : Resistencia del estator

X_s : Reactancia del estator

R_r : Resistencia del rotor

X_r : Reactancia del rotor

R_m : Resistencia de magnetización

X_m : Reactancia de magnetización

I_s : Corriente de línea

I_m : Corriente de magnetización

V_s : Voltaje de línea

$R_r \left(\frac{1-s}{s} \right)$: representa la conversión electromecánica de la potencia

El cálculo de los parámetros del circuito equivalente se lleva a cabo a través de la aplicación de dos ensayos fundamentales, el *ensayo en vacío* y el *ensayo a rotor bloqueado*. Los detalles exactos de cómo se realizan estos ensayos para el motor de inducción se describen en la norma IEEE 112. A pesar de que los detalles de la prueba se ven un poco complicados, los conceptos detrás de ellos son relativamente sencillos y se explican a continuación.

Previamente se debe realizar una tercera prueba que es la de corriente continua para obtener la resistencia del estator, la cual consiste en emplear corriente continua y de esta manera no inducir voltaje en el rotor evitando que gire, así la reactancia que se obtiene es cero, quedando así el flujo de corriente limitado únicamente por la resistencia del estator, permitiendo de esta manera su cálculo. Se empleó conexión delta en los arrollados del motor, ya que tiene la característica de que el voltaje de línea es igual al de fase, esto permitió calcular el valor preciso de la resistencia en cada fase de la máquina de inducción. (Frailes, 2003) (Fitzgerald, 1990). En la figura 16 se muestra la forma como se conectan los instrumentos de medida a dos de las entradas del motor.

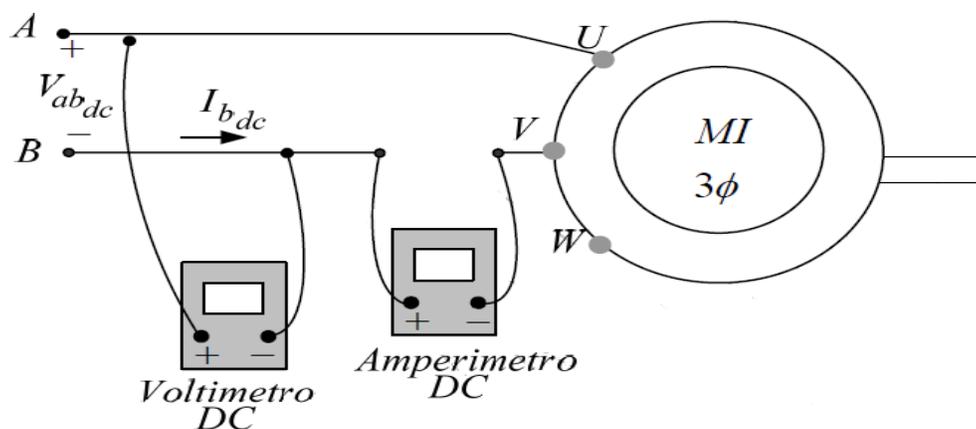


Figura 16. Medición de la resistencia en el estator. (Rios H., 2008)

4.4.3 CONSIDERACIONES

- En el montaje de la figura 16, se tomaron dos de los tres terminales de la máquina de inducción y se ajustó la corriente de sus devanados a la nominal a través de la variación de la fuente de voltaje dc.
- Fue importante el hecho de que la corriente haya sido la nominal, pues de esta manera se simularon sus condiciones normales de operación a través del calentamiento típico de los devanados.
- Posteriormente, se anotó el valor del voltaje a la que se obtuvo la corriente nominal en la máquina.
- El motor se dejó trabajando por un tiempo de 20 minutos antes de realizar las mediciones para dar tiempo a que la temperatura estabilizara y su efecto fuera considerado en la prueba.

Medición	Valor obtenido
Voltaje	61 V
Corriente	1.6 A

Tabla 20. Datos obtenidos en el ensayo de corriente continua para medir la resistencia del estator. (Elaboracion propia, 2016)

El esquema de la conexión para la realización de los cálculos de las bobinas del estator de la máquina de inducción de 300 Watt es el mostrado en la Figura 17:

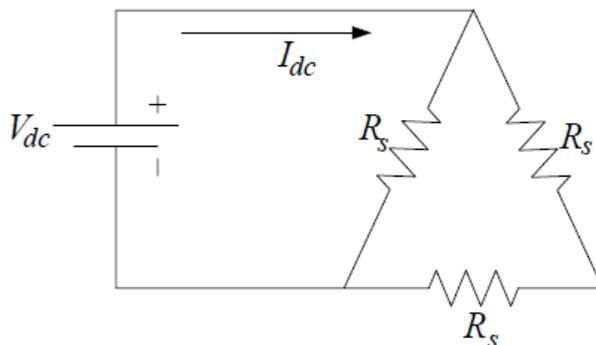


Figura 17. Conexión interna de las bobinas del estator. (Rios H., 2008)

Para mayor facilidad, éste puede ser representado por el siguiente circuito equivalente:

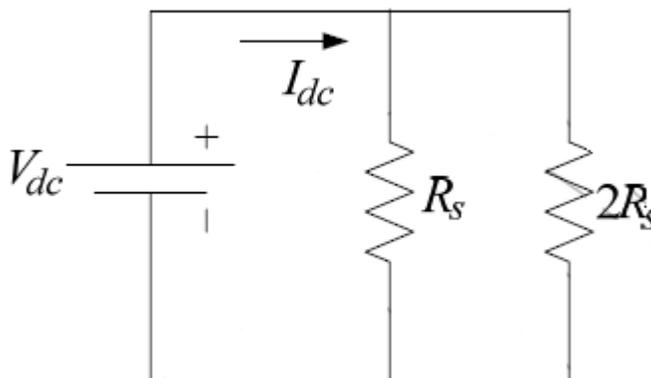


Figura 18. Circuito equivalente de las resistencias del estator. (Rios H., 2008)

De este circuito equivalente resulta evidente:

$$\frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{2R_{sdc}R_{sdc}}{R_{sdc}+2R_{sdc}} \quad \text{(Ecuación 19)}$$

$$\frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{2R_{sdc}^2}{3R_{sdc}} \quad \text{(Ecuación 20)}$$

$$\frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{2R_{sdc}}{3} \quad \text{(Ecuación 21)}$$

$$R_{sdc} = 57.18\Omega$$

El valor de la resistencia medida en corriente continua R_{sdc} , debió ser convertido a la correspondiente en corriente alterna R_s , representado por el efecto peculiar o *skin*, en donde se suele aumentar en un 10 % de la resistencia DC. (Frailes, 2003).

$$R_{sdc} = 1.1R_{sdc} = 62.90\Omega$$

Finalmente, y debido a que un principio se estableció la conexión del devanado en Δ , y a efectos del circuito equivalente, por ser representado en cada una de las fases de la máquina de inducción trifásica, los valores deben ser considerados en Y, se realiza la siguiente relación (Frailes, 2003):

$$R_s = \frac{R_{sdc}}{3} = \frac{62.90\Omega}{3} = 20.9\Omega$$

Variable obtenida con el ensayo en vacío de la máquina de inducción de 298.4 Watt.

Parámetro	Valor
R_s	20.9 Ω

Tabla 21. Resistencia en el estator. (Elaboracion propia, 2016)

4.4.4 ENSAYO EN VACÍO

De acuerdo con la norma IEEE 112, el ensayo en vacío se realizó con la finalidad de obtener el valor de las pérdidas en el rotor, pérdidas magnéticas, corriente, resistencia y reactancia de magnetización de la máquina de inducción de 300 Watt. Esta prueba consistió en hacer funcionar a la máquina sin ningún tipo de carga mecánica en el eje, es decir a rotor libre. Para esto se alimentó a frecuencia y tensión nominal en el estator y de esta manera, obtener mediciones más precisas de las corrientes de fase, tensión de línea y potencia activa de entrada. (Frailes, 2003), (Fitzgerald, 1990).

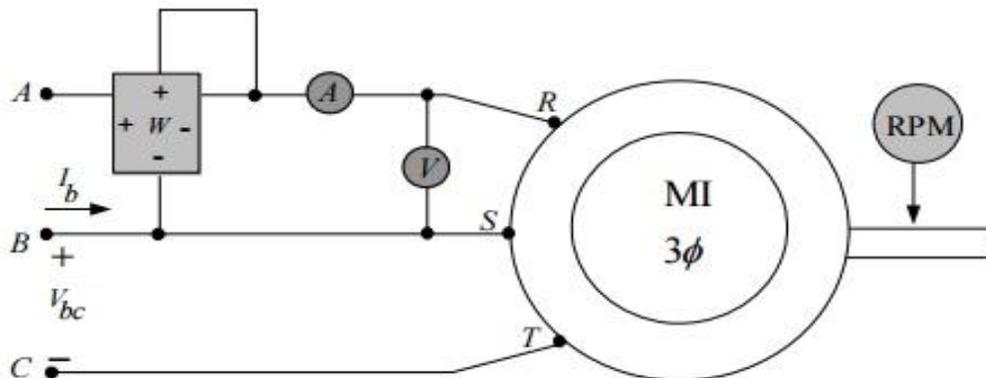


Figura 19. Medición del ensayo en vacío. (Rios H., 2008)

PROCEDIMIENTO

Se alimentó el motor a voltaje nominal y frecuencia nominal, a través de una fuente trifásica, tomando las medidas de potencia a la entrada, voltaje y corriente de línea con el instrumento FLUKE 199C y velocidad con el tacómetro digital. A continuación, las formulas a utilizar. (Frailes, 2003) (Rios H., 2008), (IEEE 112, 4 November 2004):

$$X_s + X_m = |Z_{Vac}| = \frac{V_{Vac}}{\sqrt{3} \cdot I_{Vac}} \quad \text{(Ecuación 22)}$$

$$P_{cob} = 3I_s^2 R_s \quad \text{(Ecuación 23)}$$

$$P_{rot} = P_t - P_{cob} \quad \text{(Ecuación 24)}$$

Donde

$I_{Vac} = I_s$ = corriente de la línea.

P_{rot} = Perdidas del rotor.

P_{cob} = Perdidas del cobre.

P_t = Perdidas totales.

$|Z_{Vac}|$ = Magnitud reactancia motor en vacío.

En el ensayo en vacío, el deslizamiento es aproximadamente igual a cero, y por lo tanto la potencia de la resistencia R_r/s se hace mucho mayor que la reactancia del rotor X_r y su resistencia R_r (la correspondiente a las pérdidas en el cobre del rotor). Esta condición genera una reducción del circuito equivalente Y, el cual se muestra a continuación. (Chapman, 2005).

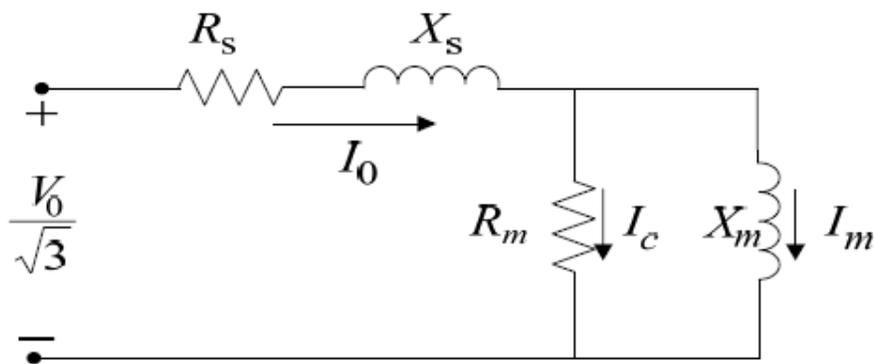


Figura 20. Circuito reducido del equivalente por el ensayo en vacío. (Rios H., 2008)

Registros de datos obtenidos

V_{Vac}	I_{Vac}	W1	W2	ω (rpm)	Pt
219,3 v	0,9 A	86w	51 w	1751	137 w

Tabla 22. Datos obtenidos con las mediciones. (Elaboracion propia, 2016)

Reemplazando:

$$X_s + X_m = |Z_{Vac}| = \frac{V_{Vac}}{\sqrt{3} * I_{Vac}} = \frac{219,3v}{\sqrt{3} * 0,9A} = 140,55\Omega$$

$$P_{cob} = 3I_s^2 R_s = 3 * (0,9^2)A * 20.9\Omega = 51w$$

$$P_{rot} = P_t - P_{cob} = 137w - 51w = 86w$$

4.4.5 ENSAYO A ROTOR BLOQUEADO

Este Ensayo permitió la obtención de los parámetros de la rama serie de la máquina de inducción de 300 watt. Esta prueba fue la última en llevarse a cabo, puesto que se necesitó del valor de la resistencia del estator para obtener R_r , X_r , X_s y X_m . (Frailes, 2003). Para su debida realización fue necesario bloquear el rotor de la máquina de inducción para impedir su movimiento, bajo esta condición, el deslizamiento es uno y la resistencia de carga será cero, lo cual indica que la máquina se comporta como un transformador cortocircuitando el secundario del mismo. (Rios H., 2008) (IEEE 112, 4 November 2004) (Frailes, 2003).

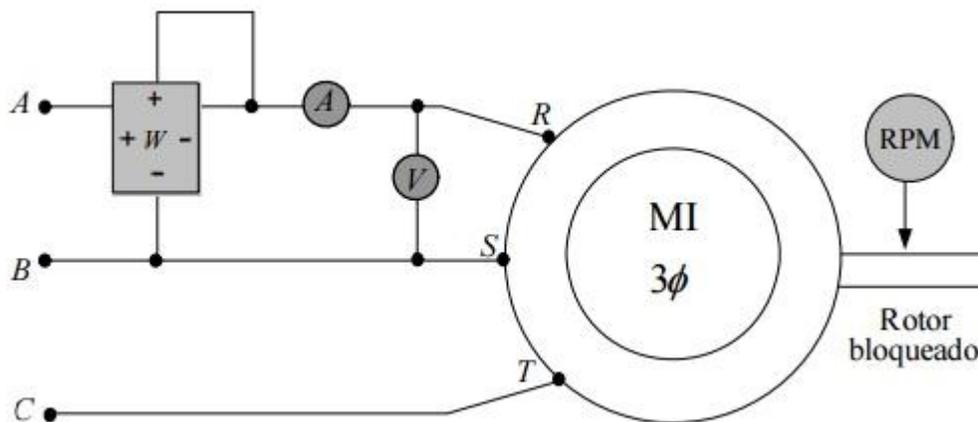


Figura 21. Medición del rotor bloqueado. (Rios H., 2008)

PROCEDIMIENTO

La norma y el ensayo a seguir fue exactamente el mismo al de vacío, la diferencia se basó en primer lugar, que el rotor estaba bloqueado a través de una herramienta manual, y en segundo lugar se ajusta una frecuencia más baja, para este caso a 40 Hz, para poder realizar dicho bloqueo al eje del motor, por ende luego de que se realizan estos ajustes se toman los valores de potencia y de tensión con la corriente nominal ajustada, se usó el FLUKE 199C, para la velocidad se utilizó el tacómetro digital. De esta manera se evita el calentamiento excesivo de los devanados de la máquina y afectar lo menos posible el motor.

A continuación las formulas a utilizar. (Frailes, 2003) (Fitzgerald, 1990) (Chapman, 2005):

$$|Z_{rb}| = \frac{V_{rb}}{\sqrt{3} \cdot I_{rb}} \quad \text{(Ecuación 25)}$$

$$\theta_{nl} = \cos^{-1} \left[\frac{P_{ent}}{\sqrt{3} V_{rb} I_{rb}} \right] \quad \text{(Ecuación 26)}$$

$$R_{rb} = |Z_{rb}| \cos \theta = R_s + R_r \quad \text{(Ecuación 27)}$$

$$X_{rb, Frb} = |Z_{rb}| \sin \theta \quad \text{(Ecuación 28)}$$

$$X_{eq, 60Hz} = \frac{f}{F_{rb}} X_{rb, Frb} = X_s + X_r \quad \text{(Ecuación 29)}$$

$$R_m = \frac{\left(\frac{V_0}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{P_{ent}}{3}} \quad \text{(Ecuación 30)}$$

Dónde:

$|Z_{rb}|$ = Magnitud impedancia motor en vacío

V_{rb} = voltaje del rotor bloqueado

I_{rb} = corriente de línea

θ_{nl} = Angulo de desfase entre V_{rb} e I_{rb}

P_{ent} = Potencia entra del rotor bloqueado

R_{rb} = Resistencia total del rotor bloqueado

$X_{rb, Frb}$ = Reactancia del rotor bloqueado a frecuencia reducida

$X_{eq, 60Hz}$ = Reactancia equivalente a frecuencia nominal

f = frecuencia nominal del motor

F_{rb} = frecuencia reducida del para rotor bloqueado

A rotor bloqueado, el deslizamiento es igual a uno y por lo tanto, la resistencia de carga será cero, lo cual indica que la máquina se comporta como un transformador cortocircuitando el secundario del mismo, esto dio origen a la reducción del circuito equivalente en **Y**, que se muestra inmediatamente:

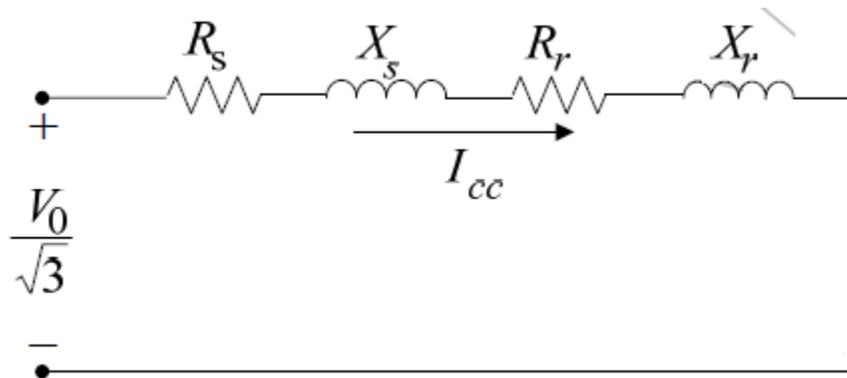


Figura 22. Circuito equivalente reducido de la máquina de inducción de 300 Watt para el ensayo a rotor bloqueado. (Rios H., 2008)

Registros de datos obtenidos

V_{rb}	I_{rb}	W1	W2	ω (rpm)	P_{ent}	F_{rb}
78v	1,6 A	110 w	40 w	1167	150 w	40Hz

Tabla 23. Datos obtenidos con las mediciones. (Elaboracion propia, 2016)

Reemplazando:

$$|Z_{rb}| = \frac{V_{rb}}{\sqrt{3} * I_{rb}} = \frac{78v}{\sqrt{3} * 1,6A} = 28.14\Omega$$

$$\theta_{nl} = \cos^{-1} \left[\frac{P_{ent}}{\sqrt{3}V_{rb}I_{rb}} \right] = \cos^{-1} \left[\frac{150w}{\sqrt{3}(78v)1,6A} \right] = 13.71^\circ$$

$$R_{rb} = |Z_{rb}| \cos\theta = 28.14\Omega * \cos 13.71^\circ = 27,367\Omega = R_s + R_r$$

$$R_r = 27,367\Omega - R_s = 27,367\Omega - 20,9\Omega = 6,467\Omega$$

$$X_{rb,40Hz} = |Z_{rb}| \sin\theta = 28.14\Omega \sin 13.71^\circ = 6,669\Omega$$

$$X_{eq,60Hz} = \frac{f}{F_{rb}} X_{rb,Frb} = \frac{60}{40} * 6.669\Omega = 10\Omega = X_s + X_r$$

$$10\Omega = X_s + X_r$$

$$X_{eq,60Hz} = 10\Omega = \frac{1}{2}(X_s + X_r)$$

$$X_s = X_r = 5\Omega$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Si consideramos lo valores obtenido en la prueba de vacío:

$$X_s + X_m = 140,55\Omega$$

$$X_m = 140,55\Omega - X_s$$

$$X_m = 140,55\Omega - 5\Omega$$

$$X_m = 135,55\Omega$$

$$R_m = \frac{\left(\frac{V_0}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{P_{ent}}{3}} = \frac{\left(\frac{219,3v}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{150}{3}} = 319,74\Omega$$

Es importante destacar que, para la obtención de estos parámetros, no se tomaron en cuenta las consideraciones en cuanto a la temperatura establecidas en el estándar 112 - 2004 de la IEEE, ya que la maquina no se sometió a funcionamientos extremos lo que implica que la temperatura de trabajo no se excedió a un nivel alto para proteger los devanados del motor. (IEEE 112, 4 November 2004).

Tomando en cuenta la siguiente tabla de clasificación y la corriente de arranque de la máquina que se encuentra en la placa del motor ($2,8 \cdot I_n$), se consideró que el motor de 300 watt correspondía a la clase NEMA F, adicional se verificó y constató con el fabricante SIEMENS. (Siemens).

Clase NEMA	Par de arranque Carr/Cn	Corriente de Arranque	Regulación de Velocidad (%)	Nombre de clase del motor
A	1.5-1.75	5-7	2-4	Normal
B	1.4-1.6	4.5-5	3.5	De propósito general
C	2-2.5	3.5-5	4-5	De doble jaula alto par
D	2.5-3.0	3-8	5-8 , 8-13	De alto par alta resistencia
F	1.25	2-4	mayor de 5	De doble jaula, bajo par y baja corriente de arranque.

Figura 23. Tabla de clasificación NEMA. (Yescas, 2009)

4.4.6 PARÁMETROS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS

Parámetro	Variable	Valor
Resistencia del estator	R_s	20,9 Ω
Reactancia del Estator	X_s	5 Ω
Resistencia del rotor	R_r	6,467 Ω
Reactancia del rotor	X_r	5 Ω
Resistencia de magnetización	R_m	319,74 Ω
Reactancia de magnetización	X_m	135,74 Ω

Tabla 24. Parámetros característicos de la máquina de inducción de 300W. (Elaboración propia, 2016)

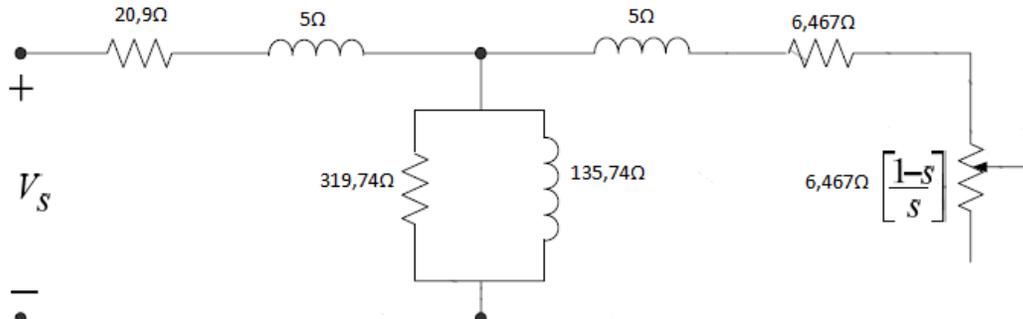


Figura 24. Circuito equivalente con los parámetros obtenidos de los ensayos. (Elaboración propia, 2016)

Ahora si se alimenta el motor a 220V y se le conecta la carga nominal, podemos determinar las pérdidas del motor, la eficiencia y el torque. Sabiendo de antemano que:

Parámetro	Variable	Valor
Resistencia del estator	R_s	$20,9\Omega$
Reactancia del Estator	X_s	5Ω
Resistencia del rotor	R_r	$6,467\Omega$
Reactancia del rotor	X_r	5Ω
Reactancia de magnetización	X_m	$135,74\Omega$
Pérdidas rotacionales	P_{rot}	86 w

Tabla 25. Parámetros de la máquina de inducción de 300W. (Elaboración propia, 2016)

Para ello se utilizarán las siguientes ecuaciones. (Chapman, 2005):

La velocidad sincrónica. Ecuación 6 y ecuación 4.2:

$$n_{sinc} = \frac{120f_e}{P} = \frac{120(60\text{Hz})}{4\text{ polos}} = 1800\text{ rpm}$$

$$\omega_{sinc} = (1800\text{ r/min}) \left(\frac{2\pi\text{rad}}{1\text{r}}\right) \left(\frac{1\text{min}}{60\text{s}}\right) = 188,5\text{ rad/s}$$

Calcular el deslizamiento a voltaje y frecuencia nominales. Ecuación 2:

$$S = \frac{n_s - n_m}{n_s} * 100 = \frac{1800 - 1640}{1800} * 100 = 8,8\%$$

La velocidad mecánica del eje del rotor. Ecuación 4 y ecuación 4.1:

$$n_m = (1 - S)n_{sinc}$$

$$n_m = (1 - 0,088)(1800) = 1641.4 \text{ r/min}$$

$$\omega_m = (1 - S)\omega_{sinc}$$

$$\omega_m = (1 - 0,088)(188,5) = 171,91 \text{ rad/s}$$

Impedancia referida de rotor. Ecuación 7:

$$Z_r = \frac{R_r}{S} + jX_r$$

$$Z_r = \frac{6,467}{0,088} + j5 = 73,49 + j5 = 73,66\langle 3,89^\circ \Omega$$

La impedancia de magnetización más la del rotor combinada. Ecuación 7.1:

$$Z_f = \frac{1}{\frac{1}{jX_m} + \frac{1}{Z_r}}$$

$$Z_f = \frac{1}{-0,0074j + 0,0135\langle -3,89^\circ \Omega} = \frac{1}{0,01\langle -36,5^\circ} = 100\langle 36,5^\circ \Omega$$

La impedancia total. Ecuación 7.2:

$$Z_{est} = (R_s + jX_s) : \text{Impedancia del estator}$$

$$Z_T = Z_{est} + Z_f$$

$$Z_T = (20,9 + 5j) + (100\langle 36,5^\circ \Omega)$$

$$Z_T = 101,3 + 64,5j = 120,1\langle 32,49^\circ \Omega$$

La corriente resultante del estator. Ecuación 7.3:

$$I_{estator} = \frac{V_\theta}{Z_T}$$

$$I_{estator} = \frac{127\langle 0^\circ v}{120,1\langle 32,49^\circ} = 1,06\langle -32,49^\circ A$$

El factor de potencia del motor. Ecuación 8:

$$PF = \cos \theta$$

$$PF = \cos 32,49 = 0,84 \text{ En atraso}$$

La potencia de entrada del motor. Ecuación 8.1

$$P_{in} = \sqrt{3}V_T I_L \cos \theta$$

$$P_{in} = \sqrt{3} * 220 * 1,06 * 0,84 = 339 \text{ W} = 0,45 \text{ hp}$$

Las pérdidas del cobre en el estator de la máquina. Ecuación 8.2:

$$P_{SCL} = 3I_L^2 R_1$$

$$P_{SCL} = 3 * 1,06A^2 * 20.39\Omega = 68.73 \text{ w}$$

La potencia del entre hierro. Ecuación 8.6:

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL}$$

$$P_{AG} = 339 \text{ W} - 68.73 \text{ w} = 270.27 \text{ W}$$

La potencia convertida. Ecuación 8.10:

$$P_{conv} = (1 - S)P_{AG} = (1 - 0,088)(270.27) = 246,48\text{W}$$

La potencia de salida. Ecuación 8.11:

$$P_{out} = P_{conv} - P_{rot}$$

$$P_{out} = 246,48\text{w} - 86 \text{ w} = 160 \text{ w} = 0,21 \text{ hp}$$

El par inducido. Ecuación 9:

$$T_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sinc}}$$

$$T_{ind} = \frac{270.27 \text{ W}}{188,5 \text{ rad/s}} = 1,4 \text{ N.m}$$

El par de salida. Ecuación 10:

$$T_{carga} = \frac{P_{out}}{\omega_m}$$

$$T_{carga} = \frac{160\text{w}}{171,91 \text{ rad/s}} = 0,93 \text{ N.m}$$

La eficiencia del motor en esta condición de operación es. Ecuación 11.

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\%$$

$$n = \frac{160 \text{ w}}{339 \text{ W}} * 100\% = 47\%$$

Teóricamente la eficiencia del motor trabajando solo sería del 47% a velocidad y carga nominal, en la placa del motor el fabricante registra una eficiencia del 63.3%, la diferencia en parte podría ser atribuida a que el motor utilizado es de uso didáctico, comúnmente trabajando con un variador de velocidad a frecuencias bajas, donde se nota que el motor alcanza temperaturas altas, las cuales van afectando las características de sus devanados. Además, no se conoce el estado de mantenimiento del motor en cuanto a rodamientos se refiere. Por otro lado, con las pruebas realizadas se encontró que a máxima carga el motor solo, alimentado por el variador puede alcanzar una eficiencia máxima del 77%, atribuible en parte a que el variador posibilita mejorar algunas condiciones de operación del sistema como en este caso la eficiencia máxima a plena carga. Sin embargo, se tiene que recordar que el variador también consume una potencia para su funcionamiento y también tiene pérdidas, llevando que a condiciones nominales la eficiencia del sistema sea del 64%, 13% menos que la del motor solo.

En cuanto al torque teórico del motor obtenido de 0.93 Nm, resultó ser mayor que el real calculado con mediciones de potencia, donde se obtuvo un torque de 0.7 Nm. Las protecciones del variador de velocidad actúan cuando se está cerca de la corriente nominal, situación que se supera fácilmente cuando se trabaja a bajas velocidades y que fue el criterio que se tuvo en cuenta para la selección de la mínima resistencia a colocar como carga de 1.9 ohmios, se observa que para las condiciones nominales de velocidad la corriente puede ser mayor, lo que se logra con una resistencia de menor nominación, esto quiere decir que el motor no fue exigido a su máximo torque en la velocidad nominal.

Una vez realizados los ensayos del motor de inducción se ha cumplido con uno de los objetivos específicos que consiste en determinar todos los parámetros bajo la norma IEEE 112 DE 2004, que conforman al circuito equivalente.

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 CONCLUSIÓN GENERAL

El uso de variadores de velocidad en motores de inducción trifásicos representa importantes beneficios en el campo del control y la automatización. Además, se posibilita el control del arranque de los motores evitando picos de corrientes que pueden afectar la vida útil del motor y el sistema eléctrico de la red eléctrica. Sin embargo, no es muy claro lo que pasa desde el punto de vista energético; la utilización conjunta de un variador de velocidad con un motor de inducción, sobre todo al someter el sistema a diferentes velocidades y torques.

La metodología utilizada en este proyecto para determinar la eficiencia de sistemas compuestos por variador de velocidad, motor y carga debe contemplar los siguientes aspectos:

1. Determinar el tipo de carga a colocar.
 - a. Carga mecánica variable y torquímetro
 - b. Sistema de frenado controlado y un torquímetro,
 - c. Sistema de carga indirecto al que se le pueda determinar la potencia consumida

En este caso se utilizó un sistema de carga compuesto por un alternador y resistencias conectadas a este. La salida de voltaje del alternador es de DC y se puede determinar fácilmente la potencia entregada a las resistencias a partir de las mediciones de corriente y voltaje. Se requiere la caracterización del alternador para conocer de antemano su gasto energético ante diferentes condiciones de carga y velocidad.

2. Selección de equipos de medida en especial los que se colocarán a la salida del variador de velocidad para medir potencia. Hay un condicionamiento especial que tiene que ver con la frecuencia que maneja el variador a la salida, por lo que se debe disponer de un vatímetro que tenga filtro pasa baja. La metodología utilizada para alcanzar el objetivo principal de este proyecto depende de que se coloque un equipo adecuado para medición de potencia a la salida del variador de velocidad, debido a que estos dispositivos electrónicos generan ruido a la red eléctrica y la señal que entregan al motor no es una onda senoidal perfecta, lo cual dificulta la medición de las variables requeridas para el cálculo de la eficiencia. Adicionalmente, los valores de las variables eléctricas que se pueden leer del mismo variador de velocidad, se basan en aproximaciones matemáticas y no datos reales y confiables. En este caso se utilizó el analizador de redes Fluke 199C, el cual dispone de filtros pasa bajas que posibilitan su uso a la salida de variadores de velocidad.
3. Realizar pruebas a diferentes velocidades y cargas midiendo las potencias y velocidades en los diferentes puntos del sistema. También se deja registro de voltajes corrientes y factor

de potencia donde sea aplicable. Se debe atender las sugerencias dadas en la norma IEEE 112 DE 2004 para encontrar eficiencias y torques.

En este punto se aplica un balance energético para encontrar el flujo de energía en el sistema, las pérdidas y las eficiencias. La potencia del sistema está dada por:

$PT = \text{Pérdidas del variador} + \text{Pérdidas del motor} + \text{Pérdidas en el alternador} + \text{Pérdidas mecánicas del motor y el alternador} + \text{Potencia en la carga.}$

Donde PT es la potencia al sistema proveniente de la red. Previamente se tenía caracterizado el alternador donde se encontraron las pérdidas del mismo para las cargas y velocidades de estudio. Se trató de que las pérdidas mecánicas quedaran incluidas en la caracterización del alternador puesto que se realizaron en la misma planta con el mismo sistema de transmisión.

4. Obtención de los parámetros del motor según normatividad. Con estos parámetros se pueden calcular los valores teóricos de: potencia, factor de potencia, eficiencia y torque.

Analizando los resultados obtenidos se puede inferir de la gráfica 7 y de los parámetros encontrados que el uso del variador puede ayudar a mejorar la eficiencia del motor, aumentando esta cuando se aumenta la carga hasta la nominal. El motor es más eficiente operando a su máxima velocidad y en condiciones de carga nominal.

Según los resultados de las pruebas realizadas a condiciones nominales, se encuentra que el uso del variador de velocidad a pesar de posibilitar el control del motor; conlleva a un costo energético adicional, agregando un punto más de consumo de potencia que es considerado como pérdida, disminuyendo la eficiencia en 13% con respecto a la del motor. El factor de potencia del sistema utilizado, también se ve afectado al ser menor que el registrado por el propio motor (de $FP=0.69$ pasa a $FP= 0.38$). El hecho de disminuir la velocidad hace que disminuyan la eficiencia (hasta el 50% para 900 RPM) y el factor de potencia del sistema (a $FP= 0.28$ para 900 RPM).

Para pruebas con cargas inferiores a la nominal, se observa un comportamiento progresivo en la disminución de la eficiencia y empeorando a medida que disminuye la velocidad, cayendo a eficiencia hasta el 37% para una velocidad de 900 RPM trabajando con el alternador en vacío. Esto explica el fenómeno por el cual el motor se calienta fuera de lo normal cuando trabaja a velocidades bajas, aun trabajando con cargas pequeñas.

Se consideran algunas ventajas y desventajas con el uso de variadores de velocidad, estas se mencionan a continuación:

VENTAJAS

- Se evidencia un ahorro de energía por efectos de reducción del pico del par de arranque lo cual se logra gracias a los tiempos de aceleración controlada.
- Aumenta la vida útil del motor en cuanto a la reducción de impactos mecánicos y eléctricos ya que no permite que el motor opere por encima de sus valores nominales.

- Se puede controlar la velocidad del motor

DESVENTAJAS

- Generación de armónicos
- Generan ruido eléctrico de alta frecuencia que pueden afectar otros dispositivos
- Se requiere de equipos de medida especializados para obtener mediciones confiables de las variables.
- A velocidades bajas se nota un calentamiento anormal del motor que puede afectar su vida útil.

5.2 CONCLUSIONES COMPLEMENTARIAS

Se cumplió a con la Implementación de un banco de prueba para el desarrollo de los ensayos del sistema variador- motor de inducción. Esta planta se deja en la institución como aporte a la investigación y proyectos futuros con otros estudiantes.

Se pudo determinar la eficiencia de un sistema variador-motor a diferentes frecuencias.

Se Determina los parámetros del motor de inducción de baja potencia bajo la norma IEEE 112 DE 2004.

5.3 RECOMENDACIONES

Investigar las aplicaciones que permiten un ahorro de energía con los variadores de velocidad y demostrar con resultados y mediciones en el tiempo cual fue ese ahorro en kWh.

Determinar la eficiencia de este sistema con el uso de un sensor de torque que permita calcular la potencia mecánica en la carga, previamente debe conocerse la potencia eléctrica a la entrada del sistema. La planta cuenta con los accesorios y acoples necesarios para la utilización de un sensor de este tipo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6. ANEXOS

Generalidades y especificaciones técnicas de los equipos utilizados para las pruebas, adicional un link para mayor información:

ANEXO A

Motor Siemens 1LA7 070-4YC60.

- Motor trifásico, 60Hz.
- Tensiones nominales 220/440V.
- Corrientes nominales 1.6/0.8ª.
- Potencia 0.4HP.
- Rotor jaula de ardilla.

<http://www.invingenieros.com/Web/CATALOGOS/10.pdf>

ANEXO B

Variador Siemens Micromaster 440

- Fácil de instalar.
- Puede funcionar en alimentación de línea IT.
- 3 relés de salida.
- 2 salidas analógicas (0 – 20 mA).
- 6 entradas digitales NPN/PNP aisladas y conmutables.
- 2 entradas analógicas:
 - ✓ ADC1: 0 – 10 V, 0 – 20 mA y -10 a +10 V.
 - ✓ ADC2: 0 – 10 V, 0 – 20 mA.
- Altas frecuencias de pulsación (según convertidor, hasta 16 kHz) para funcionamiento silencioso del motor.

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/158/15274158/att_20447/v1/440_OPI_sp_0603_15274158.pdf

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ANEXO C

Analizador de calidad de la energía eléctrica Fluke 43B

- Medida de energía (W, VA, VAR) y factor de potencia (PF, DPF).
- Energía y factor de potencia en cargas trifásicas equilibradas.
- Armónicos de tensión, corriente y potencia hasta el orden 51º.
- Medida de fluctuaciones ciclo a ciclo durante un máximo de 24 horas.
- Captura automáticamente hasta 40 transitorios en tan sólo 40 ns.
- Mide corriente de arranque de motores. Medida con cursores.
- Cubre un rango de frecuencia amplio (10 a 400 Hz).

Link para la descarga del manual en español:

<http://www10.ujaen.es/sites/default/files/users/ingele/guiaaplicacionesfluke43b.pdf>

ANEXO D

Analizador de la energía y de la calidad eléctrica Fluke 435

- Eficiencia de inversores de potencia: Permite medir simultáneamente la potencia de salida CA y la potencia de entrada CC para sistemas electrónicos de potencia usando la pinza CC opcional.
- Captura de datos Power-Wave: captura rápidamente datos RMS, muestra medios ciclos y formas de onda para caracterizar las dinámicas de los sistemas eléctricos (arranques de generadores, conmutación de SAI, etc.).
- Calculadora de Pérdida de Energía: Las mediciones clásicas de potencia activa y reactiva, desequilibrios y armónicos se cuantifican para poner de manifiesto el coste fiscal de las pérdidas de energía.
- Solución de problemas en tiempo real: Analice las tendencias con los cursores y las herramientas de ampliación.
- La clasificación de seguridad más alta de la industria: Clasificación de CAT IV a 600 V y CAT III a 1000 V para su uso en la entrada de servicio.
- Permite medir las tres fases y el neutro: Con cuatro puntas de prueba de corriente flexibles incluidas y un mejorado diseño delgado para adaptarse a los lugares más estrechos.
- Monitor del sistema: Diez parámetros de calidad de potencia en una sola pantalla, de acuerdo con la norma de calidad de potencia eléctrica EN50160.
- Función de registrador: Configurado para cualquier condición de prueba con memoria de hasta 600 parámetros a intervalos definidos por el usuario.
- Visualización de gráficos y generación de informes: Con el software de análisis incluido.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Link para la descarga del manual en español:

http://assets.fluke.com/manuals/F430-II_umspace0100.pdf

ANEXO E

Analizador De Redes Fluke 199c

- Dos canales - anchos de banda de 200MHz.
- Velocidad de muestreo en tiempo real de hasta 2,5GS/s.
- Alta tensión de 3000 puntos por canal.
- Disparo automático Connect-and-View™, una completa gama de modos de disparo manual y, además, disparo externo.
- Nuevo: Análisis del espectro de frecuencia con FFT.
- Persistencia digital para analizar formas de onda complejas dinámicas como en un osciloscopio analógico.
- Rápida velocidad de actualización de pantalla para ver instantáneamente el comportamiento dinámico de la señal.
- Captura y reproducción automáticas de 100 pantallas.
- Entradas aisladas, flotantes e independientes hasta 1000 V.
- Forma de onda de referencia para comparaciones visuales y prueba automática de "pasa / no pasa" para formas de onda.

Link para la descarga del manual en inglés.

http://www.cedesa.com.mx/pdf/fluke/fluke-19xC_2x5C_user_manual.pdf

7. BIBLIOGRAFIA

- Victor Fuentes. (1998). Obtenido de <http://html.rincondelvago.com/motor-de-induccion-trifasico.html>
- Máquinas Eléctricas*. (2003). McGraw Hill – Interamericana.
- Mi mecanica popular*. (Abril de 2003). Obtenido de <http://www.mimecanicapopular.com/vergral.php?n=180>
- Comisión Nacional Energía Eléctrica. (03 de 2010). Recuperado el 23 de 02 de 2015, de <http://www.cnee.gob.gt/EficienciaEnergetica/FIDE/004%20M%C3%B3dulo%20IV%20%28AEE%20Motores%20de%20Inducci%C3%B3n%29.pdf>
- www.aficionadosalamecanica.net/alternador-funcionam.htm. (2014).
- Almeida, D. (2000). *Métodos para la determinación de la eficiencia energética en los motores de inducción trifásicos*.
- Cenery Londoño, D. R. (2015). *Prueba de vacio motor alternador utilizando variador de frecuencia MICROMASTER 440*. Medellín.
- Chapman, S. J. (2005). *Maquinas Eléctricas*.
- Cherta, M. C. (10 de 2004). Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. Tomo IV. Máquinas síncronas y motores C.A. de colector. Máquinas síncronas y motores C.A. de colector. En https://books.google.com.co/books?id=sPDNqLiYxo0C&pg=PA171&lpg=PA171&dq=perdid as+de+un+alternador+en+vacio&source=bl&ots=ab0b6_Z7nV&sig=bDK94wws9U61tWS1K uBd_vKEmpU&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj7IWat8jNAhVHxCYKHaoOAbkQ6AEIHDAB#v=onepage&q=perdidas%20de%20un%20a.
- COLOMBIA, S. (s.f.). www.siemens.com.co.
- Corporation, ©. 2.-2. (2001-2005). http://assets.fluke.com/manuals/43b_____umspa0100.pdf.
- Desarrollos Digitales, S. d. (2014). *Ahorro de Energía usando Variadores de Frecuencia*. Obtenido de http://www.webddigital.com/articulos_variadores.aspx
- Elaboracion propia. (2016). *METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE MOTORES TRIFÁSICOS DE BAJA POTENCIA TRABAJANDO CON VARIADORES DE VELOCIDAD A DIFERENTES VELOCIDADES Y TORQUES*.
- Engineering, I. o. (s.f.). <http://search.library.wisc.edu/catalog/ocm04842635>. Obtenido de IEEE standard test code for resistance measurement / Sponsor, IEEE Power Engineering Society.

Fernando, C. M. (s.f.). Estudio sobre los estándares de evaluación electromecánica de motores y generadores de inducción según el estándar de la norma IEEE (trabajo de investigación Juan Fernando Carmona Mesa ITM).

Fitzgerald, A. E. (1990). *Electric Machinery*. McGraw Hill.

Frailas, M. (2003). *Máquinas Eléctricas*. McGraw Hill – Interamericana.

GROUP, D. L. (s.f.). <http://www.delorenzogloba.com/es/laboratori/macchine-elettriche/unilab-11-kw/macchine-a-corrente-continua/catalogo.php?sez=food&id=266&albero=0.1.256.259>.

IEEE 112, P. E. (4 November 2004). IEEE Std 122 2014 (Revision of IEEE Std 112-1996. PDF: SS95211.

INDIEL. (2005). *MANUAL DE TALLER*. Obtenido de ALTERNADORES:
<http://www.indiel.com.ar/images/catalogos/2010/manual%20de%20alternadores.pdf>

JIMENEZ, J. C. (2007). Obtenido de <http://www.ie.itcr.ac.cr/juanjimenez/cursos/Potencia/motor>

Lorenzo, D. (2002). *DE LORENZO ENGINEERING TRAINING SOLUTIONS*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2015, de <http://www.delorenzogloba.com/upload/schede/1391783028-UNILAB%20SPA%205.pdf>

Lorenzo, D. (2002). *DE LORENZO ENGINEERING TRAINING SOLUTIONS*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2015, de http://www.delorenzogloba.com/es/risultati_cerca.php?sez=food&a=DL+1013M2&x=0&y=0

meganeboy, D. (2014). <http://www.aficionadosalamecanica.net/alternador-funcionam.htm>.

Rios H., A. C. (2008). *Estimacion experimental de los motores Jaula de Ardilla*.

SIEMENS. (s.f.).
https://cache.industry.siemens.com/dl/files/362/11887362/att_30316/v1/MM440_PList_Span_B1.pdf.

SIEMENS, S. A. (2013). *SIEMENS*. Obtenido de https://www.industry.siemens.com/home/aan/es/colombia/Documents/lista_de_precios_colombia.pdf

Siemens, S. (s.f.). *Motores Eléctricos Industriales*. Obtenido de <http://www.proyectos-multiples.com/descargas/siemens.pdf>

Society, I. P. (4 November 2004). IEEE Std 122 2014 (Revision of IEEE Std 112-1996. PDF: SS95211.

Yescas, L. (2009). *Motores electricos su clasificacion*.

FIRMA ESTUDIANTES





FIRMA ASESOR



FECHA ENTREGA: _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA DE ENTREGA: _____