

 Institución Universitaria Centro de Laboratorios	GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia	Código	FGL 029
		Versión	01
		Fecha	

Guía para la evaluación de eficiencia energética en motores de inducción en el laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia – Parque I

JUAN CARLOS CORREA CARDONA

Programa Académico

Ingeniería Electromecánica

Asesor:

BONIE RESTREPO CUESTAS

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Abril 2016

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

RESUMEN

Los motores de inducción son los principales consumidores de energía eléctrica en el mundo, actualmente son responsables del consumo del 40% de la energía eléctrica producida. Es por esta razón, que surgió la motivación para definir estrategias que lleven a verificar y controlar el consumo de energía en estos motores partiendo de su eficiencia. Como parte esencial de los estudios realizados se encuentra el análisis de la eficiencia y el consumo de energía del motor. Por tanto, se desarrolló una guía que permite ejecutar pruebas de eficiencia energética a motores de inducción en el laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia del campus Fraternidad del ITM (Parque I) con el fin de prestar el servicio a la industria local para permitir la evaluación de los motores empleados en sus procesos y que estos operen en los rangos óptimos de funcionamiento y evitar consumos adicionales por mal funcionamiento. Con base a la normatividad técnica vigente que rige este tipo de ensayos o pruebas que se realizan en este tipo de laboratorios, se desarrolló el procedimiento, partiendo de las principales normas internacionales como la IEEE 112 (Standard Test Procedure for Polyphaser Induction Motors and Generators) y la IEC 60034-2-1 (Rotating Electrical Machines) las cuales son tomadas como referencia para algunas normas técnicas colombianas. Este proyecto se ejecutó en tres etapas. Inicialmente, se realizó un estudio detallado de los motores de inducción, se investigó y se analizó la normativa vigente para este tipo de pruebas, se realizó un análisis comparativo entre dichas normas y se identificó que tipos de motores son los más utilizados en la industria local. Luego, se realizó la evaluación técnica del recurso instalado en el laboratorio, y con base a la información anterior se seleccionó la prueba a ejecutar. Por último, se realizó la construcción de la guía para realizar las pruebas de eficiencia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

RECONOCIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer muy especialmente a la asesoría brindada por la profesora BONIE JOHANA RESTREPO, por su apoyo y su confianza para que este trabajo haya llegado a ser una realidad, poco de este trabajo se habría realizado si no fuera por su dedicación y disposición.

También agradezco a la institución universitaria ITM que me acogió durante el desarrollo de mi carrera. A sus autoridades que la dirigen con su entrega y sabiduría.

Agradezco a mi madre que es el ser más maravilloso en mi mundo, gracias por el apoyo, cariño y comprensión, que desde pequeño me ha brindado, por guiar mi camino y estar siempre junto a mí, en los momentos más difíciles de mi vida.

Me gustaría expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo y sobre todo a DIOS que me ha permitido con seguir un logro más en mi desarrollo como profesional.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	5
2.	MARCO TEÓRICO	8
3.	METODOLOGÍA.....	22
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	46
6.	ANEXOS.	48
7.	REFERENCIAS	61

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

1. INTRODUCCIÓN

Las máquinas eléctricas más utilizadas para procesos industriales son los motores de inducción y se consideran los consumidores del 40% de la energía eléctrica que se produce, por tal motivo es importante definir estrategias que lleven a verificar y controlar el consumo de energía en estos motores, partiendo de su eficiencia con el fin de disminuir consumo excesivo energético, mejorar el aprovechamiento de los equipos, retorno más apropiado de las inversiones y la disminución de impactos en el medio ambiente (Vilaragut, Costa, & García, 2004).

En la actualidad los laboratorios se convirtieron en un apoyo fundamental para certificar instrumentos, procesos, materiales y herramientas de las empresas del sector industrial con el fin de plasmar los requisitos de calidad establecidos en las normas técnicas del producto, es por ello que se busca implementar nuevos servicios o herramientas que permitan cumplir los requisitos del producto con excelente calidad y así satisfacer las necesidades finales del cliente.

Actualmente el laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia del campus Fraternidad del ITM (Parque I) en busca de dar provecho al recurso instalado en el laboratorio y fomentar la formación del estudiante, pretende desarrollar una guía o procedimiento que permita ejecutar pruebas de eficiencia energética a motores de inducción con el fin de prestar el servicio a la industria local, que permita la evaluación de los motores usados y que estos operen en los rangos óptimos de funcionamiento y evitar consumos adicionales por mal funcionamiento. Con base a la normatividad técnica vigente que rige este tipo de ensayos o pruebas que se realizan en este tipo de laboratorios.

La ejecución de este proyecto se hará en tres etapas. Inicialmente, se realizará un estudio detallado de los motores de inducción, una búsqueda y análisis de la normatividad vigente para este tipo de pruebas, un análisis comparativo entre dichas normas y se identificarán que tipos de motores son los más utilizados en la industria local. Luego, se realizará la evaluación técnica del recurso instalado en el laboratorio, y con base a la información anterior se seleccionará la prueba a analizar. Por último, se realizará la construcción de la guía.

1.1 Justificación

Los motores de inducción son los principales consumidores de energía eléctrica en el mundo. Según estudios realizados por el SEEEM (Standards for Efficiency of Electric Motor Systems), los motores inducción y los sistemas de motores en la industria, son responsables de aproximadamente un 40% de la energía consumida en el mundo. Desde hace algunos

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

años en países como Canadá, Estados Unidos, México, Brasil, Europa, Rusia, entre otros, se llevan a cabo estudios para la disminución del consumo de energía en estos motores. Como parte esencial de estos estudios está la determinación de su eficiencia y del consumo de energía del motor (Guardiola de Cabo, 2008).

En la literatura técnica y en las normas existen diferentes métodos que permiten determinar la eficiencia energética de dichos equipos. Algunos de ellos, por su alto grado de exactitud, requieren de equipos costosos, como analizadores de redes y medidores de par. Por otro lado, existen otros más aproximados y económicos, por ser de más fácil realización y más baratos por utilizar un mínimo de instrumentos.

Para mejorar el rendimiento en sistemas conformados por motores eléctricos es necesario conocer en detalle la eficiencia y pérdidas del mismo. Actualmente existen diferentes normativas que definen procedimientos para la evaluación del rendimiento en motores de inducción, como son IEC 60034-2-1, IEEE 112 B, IEEE 112 E, IEC61972; Las cuales contienen metodologías para la obtención de las pérdidas y la evaluación de la eficiencia energética de los motores (Álvarez Fernández, 2007).

Con el fin de dar provecho a los equipos que se encuentran actualmente instalados en el Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia - Parque I, se pretende establecer una guía o procedimiento para realizar pruebas de eficiencia energética a motores de inducción basada en normas internacionales y locales. Adicionalmente se pretende, evaluar la conformidad de los equipos existentes para la aplicación de los métodos de prueba establecidos e identificar las necesidades adicionales; con el fin de plantear como propuesta la prestación del servicio de evaluación de eficiencia energética en motores de inducción a la industria local desde el Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM.

1.2 Planteamiento del problema

Se ha comprobado que aproximadamente 40% 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 partiendo de los procesos donde interviene maquinas rotativas como los motores de inducción (Guardiola de Cabo, 2008).

Las universidades en los últimos años no se han enfocan solo en la docencia e investigación, también pretenden prestar servicios como en la metrología, calibración de instrumentos, medición de eficiencia energética, desempeño y seguridad de los sistemas eléctricos. Se observa la necesidad de promover avances concretos, por lo cual el Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia del campus Fraternidad del ITM (Parque I) debe iniciar un esquema de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

estructuración con el propósito de prestar servicios de alta calidad y de esta manera contar con la capacidad de realizar pruebas confiables, que puedan beneficiar a la institución tanto en el proceso de formación de personas, así como en la entrega de servicios de alta calidad a los clientes potenciales del laboratorio. Es por esto, que se pretende generar y estructurar una guía para realizar ensayos de eficiencia energética basada en las normas vigentes para la evaluación de eficiencia energética en motores de inducción.

1.3 Objetivos del proyecto

General

Desarrollar una guía para la evaluación de eficiencia energética en motores de inducción con base en la normatividad vigente, nacional e internacional, en el laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia – Parque I.

Específicos

- Realizar un análisis comparativo entre la normatividad vigente nacional e internacional asociada a la evaluación de eficiencia energética en motores de inducción.
- Seleccionar una prueba a desarrollar, partiendo de la evaluación del recurso instalado en el laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia – Parque I.
- Generar la guía de aplicación de la prueba seleccionada, a partir de una metodología para su desarrollo al interior del laboratorio.

1.4 Organización del trabajo

En la primera parte se plasman las generalidades del trabajo realizado, junto con los objetivos que son la base del desarrollo de la guía para realizar pruebas de eficiencia en los motores de inducción.

En una segunda parte se presenta la metodología utilizada por las diferentes normas las cuales son objeto de estudio del presente informe y se desarrolló actividades comparativas de la normativa vigente para realizar este tipo de ensayos.

Seguidamente, una vez identificado el procedimiento a seguir y los aspectos principales para la prueba basados en la normativa, se evaluó los equipos instalados en un laboratorio con miras a la ejecución de dichas pruebas.

En una tercera parte, se plasman los resultados de la revisión realizada de la normativa dando a conocer la guía para la evaluación de eficiencia en los motores de inducción y las necesidades actuales del laboratorio para la ejecución de dicha prueba y buscando satisfacer la norma aplicable a este ensayo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Motores de Inducción

El motor de inducción trifásico, también llamado motor asíncrono, es hoy día el motor eléctrico que más se utiliza en las aplicaciones industriales, sobre todo el motor con rotor de jaula de ardilla (Rockwell, 1997).

Se da el nombre de motor asíncrono al motor de corriente alterna cuya parte móvil gira a una velocidad distinta a la de sincronismo. Aunque a frecuencia industrial la velocidad es fija para un determinado motor, hoy día se recurre a variadores de frecuencia para regular la velocidad de estos motores.

2.1.1 Principios de funcionamiento

La sección del motor de inducción trifásico, tal como se muestra en la Figura 1, se compone de un bastidor o estator fijo, un bobinado trifásico alimentado por una red eléctrica trifásica y un rotor giratorio. No hay ninguna conexión eléctrica entre el estator y el rotor. Las corrientes del rotor se inducen desde el estator a través del entrehierro. Tanto el estator como el rotor están fabricados de una lámina de núcleo altamente magnetizable que proporciona pérdidas por corrientes de Foucault e histéresis baja.

2.1.2 Estator

El bobinado del estator está formado por tres bobinados individuales que se superponen y están decalados con un ángulo eléctrico de 120°. Cuando se conecta a la alimentación, la corriente de entrada primero magnetiza el estator. Esta corriente de magnetización genera un campo rotativo que gira con la velocidad de sincronismo n_s .

Velocidad de sincronismo $n_s = 60 \frac{f}{p}$
 $n_s = \text{velocidad del sincronismo /minuto}$

$f = \text{frecuencia } s^{-1}(\text{segundo})$

$p = \text{numero de pares de polos (numero de pares de polo/2)}$

Para el número de pares de polos más pequeño $2p = 2$ en un circuito de 50 Hz, la velocidad sincrónica más alta es $n_s = 3000/\text{min-1}$. Las velocidades sincrónicas de un circuito de 50 Hz se indican en la Tabla 1.

2.1.3 Rotor

En los motores de inducción con rotor de jaula de ardilla (ver Figura 1), el rotor está formado por un bloque laminar de núcleo de rotor cilíndrico y ranurado provisto de barras de aluminio unidas por delante con anillas para formar una jaula cerrada.

El rotor de los motores de inducción trifásicos a veces se denomina rotor. Este nombre tiene su origen en la forma de ancla que tenían los rotores de los primeros dispositivos eléctricos. En un equipo eléctrico, el bobinado del rotor está inducido por el campo magnético, mientras que en los motores trifásicos, este papel corresponde a los rotores. Las velocidades sincrónicas son un 20% más alta en un circuito de 60 Hz.

Pares de polos 2p	2	4	6	8	10	12	16	24	32	48
n_s en rpm	3000	1500	1000	750	600	500	375	250	188	125

Tabla 1 . Velocidades sincrónicas típicas de un circuito de 50 Hz



Figura 1. Motor trifásico de jaula de ardilla de última generación

Los motores eléctricos, son máquinas eléctricas que transforman la energía eléctrica que absorben por sus bornes en energía mecánica. A partir de su alimentación, se clasifican en:

- **Motores de corriente continúa**
 - De excitación independiente.
 - De excitación serie.
 - De excitación (*shunt*) o derivación.
 - De excitación compuesta (*compound*).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

- **Motores de corriente alterna**
 - Motores síncronos.
 - Motores asíncronos.
- **Monofásicos.**
 - De bobinado auxiliar.
 - De espira en cortocircuito.
 - Universal.
- **Trifásicos.**
 - De rotor bobinado.
 - De rotor en cortocircuito (jaula de ardilla).

Los motores de corriente alterna asíncronos, tienen una aplicación más generalizada gracias a su facilidad de utilización, poco mantenimiento y bajo costo de fabricación. Por ello, son el objeto de este proyecto.

2.1.4 Campo magnético giratorio

Si tomamos un conjunto de chapas magnéticas que tienen la forma mostrada en la Figura 2 en la cual se ha realizado una serie de ranuras (seis en este dibujo), y las mismas se apilan con un elemento aislante entre ellas, formando un cilindro cuyo eje es perpendicular al plano del dibujo, obtenemos lo que se llama el estator de una máquina eléctrica rotante.

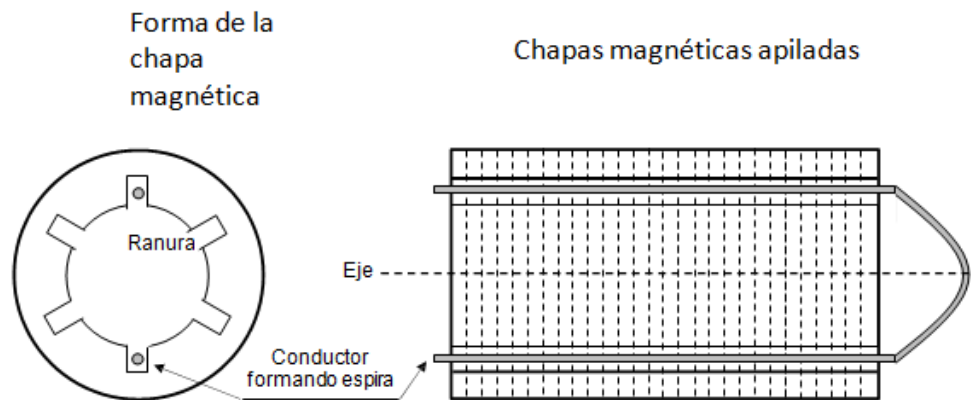


Figura 2. Estator de una máquina rotante

Un par de ranuras opuestas diametralmente como la superior e inferior, y en ellas coloquemos una bobina que llamaremos “ $u_1 - u_2$ ”, de “ N ” espiras (En el dibujo se esquematiza un solo conductor a los efectos de simplificar el mismo). La misma tiene un eje magnético perpendicular al plano de la misma y que en este caso su dirección es horizontal, tal como se muestra en la Figura 3.

Si ahora efectuamos el mismo procedimiento con la bobina “v1 – v2”, vemos que su eje magnético forma un ángulo de 120° geométricos con respecto a la anterior, lo cual repetimos con la tercera bobina “w1 – w2”. Resumiendo hay tres bobinas idénticas con su eje magnético desplazado en 120° geométricos.

Las tres bobinas se unen en un punto común ($u_2 = v_2 = w_2$), con lo que las mismas quedan conectadas en disposición estrella, tal como se muestra en la Figura 3.

Si se alimentan las tres bobinas mediante un sistema trifásico de tensiones, por las mismas circularán corrientes de igual módulo, pero desfasadas eléctricamente en 120°, tal como se muestra en la Figura 4. Las corrientes que circulan dan origen a fuerzas magnetomotrices en cada una de las bobinas, cuya magnitud depende del número de espiras y del valor de la corriente instantánea.

La convención de signos a adoptar es que las corrientes son positivas si el borne de entrada es u_1 , v_1 o w_1 (negativas si son salientes), tal como se muestra en la Figura 5.

En el esquema de la máquina las corrientes entrantes se esquematizan con una cruz (+) y las salientes con un punto (•)

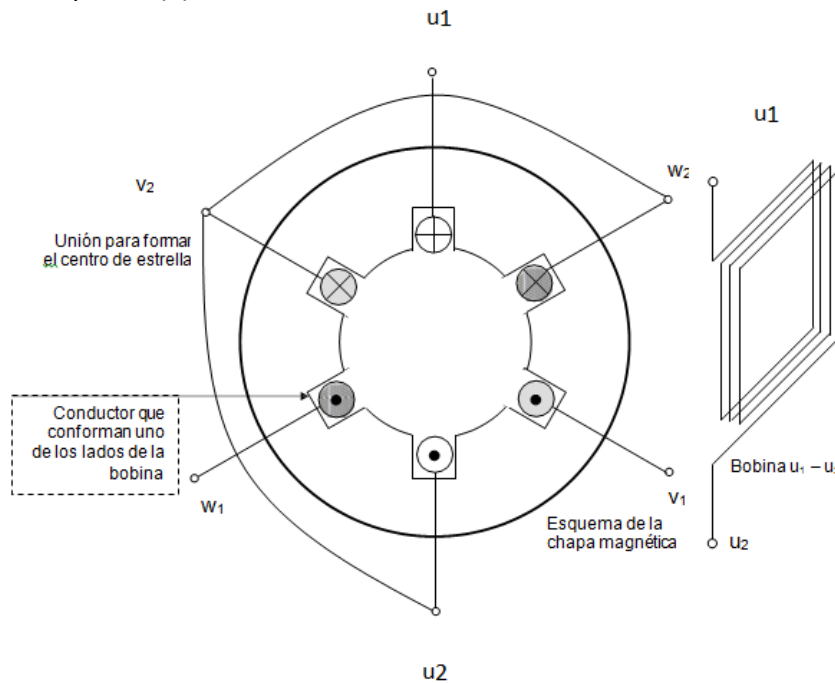


Figura 3. Detalle del estator y bobinas de una máquina rotante

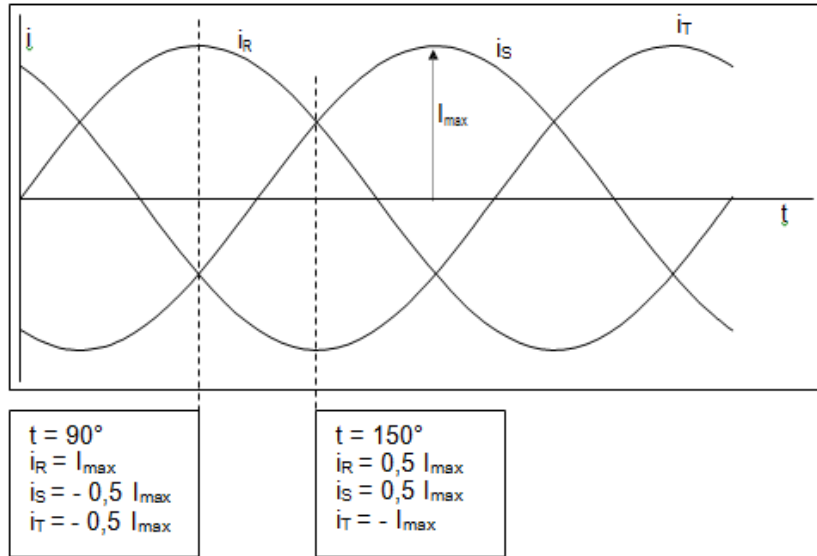


Figura 4. Valores instantáneos de las corrientes en los bobinados

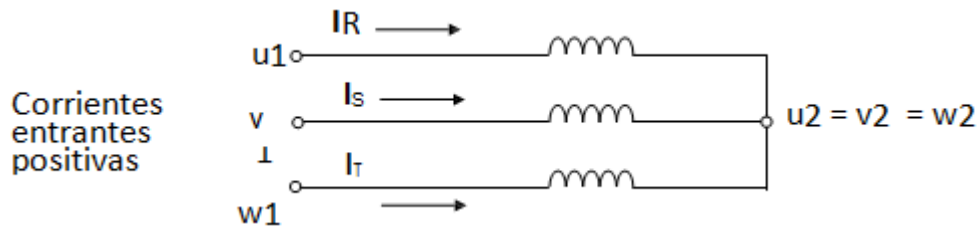


Figura 5. Convención de los signos de las corrientes en una máquina de dos polos magnéticos

Luego para el instante en el cual el ángulo eléctrico es 90° , la corriente i_R es positiva (entra por $u1$) y las otras dos son negativas (salen por $v1$ y $w1$), lo cual se observa en la Figura 6 y en la Figura 7.

Las corrientes en las bobinas originan fuerzas magnetomotrices cuyas magnitudes y sentidos son los indicados en el esquema de la figura 9, en la cual se ha dibujado la resultante de las mismas. Se obtiene un campo magnético de dos polos. En la figura 8 se han dibujado las líneas de campo magnético que abrazan corrientes de igual sentido, y que de acuerdo a lo indicado el esquema corresponde a un sistema de dos polos magnéticos. Si efectuamos el mismo análisis, pero para el instante de 150° , los sentidos de las corrientes y las fuerzas magnetomotrices resultantes se encuentran dibujados en las Figura 8 y Figura 9.

De la observación de los dos tiempos analizados, llegamos a la conclusión que la fuerza magnetomotriz resultante se mantiene constante y que la misma ha girado un ángulo geométrico de 60° ante un avance de la corriente de 60° eléctricos.

De la misma manera se puede realizar el análisis para otros ángulos, llegando a que el campo magnético resultante obtenido, alimentando un conjunto de bobinas cuyo eje magnético está desplazado 120° geométricos, por medio de un conjunto de corrientes desfasadas 120° en el tiempo, es de módulo constante que gira a razón de una vuelta por cada ciclo que cumplen las corrientes.

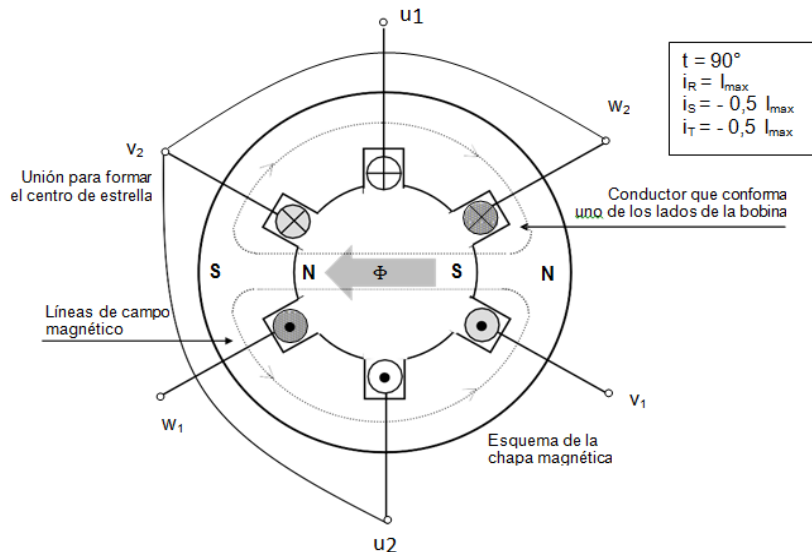


Figura 6. Detalle del estator y bobinas de una máquina rotante con dos polos magnéticos y con el sentido de las corrientes para $t = 90^\circ$

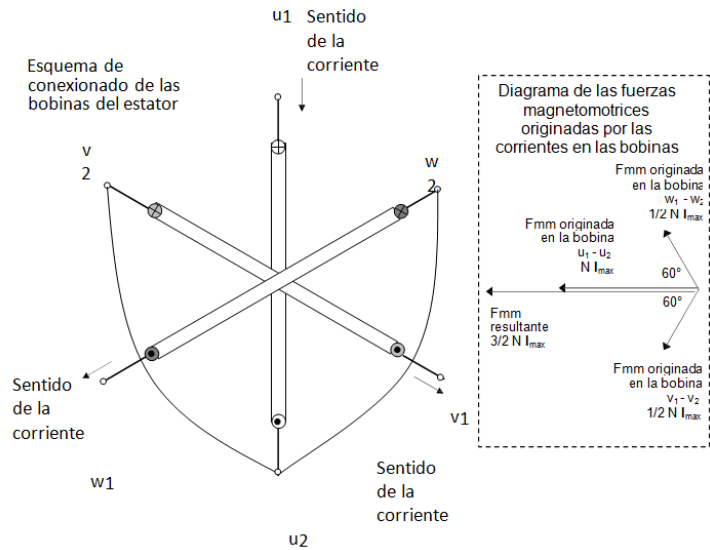


Figura 7. Disposición de las bobinas estatóricas y fuerzas magnetomotrices que originan para un ángulo eléctrico de 90°

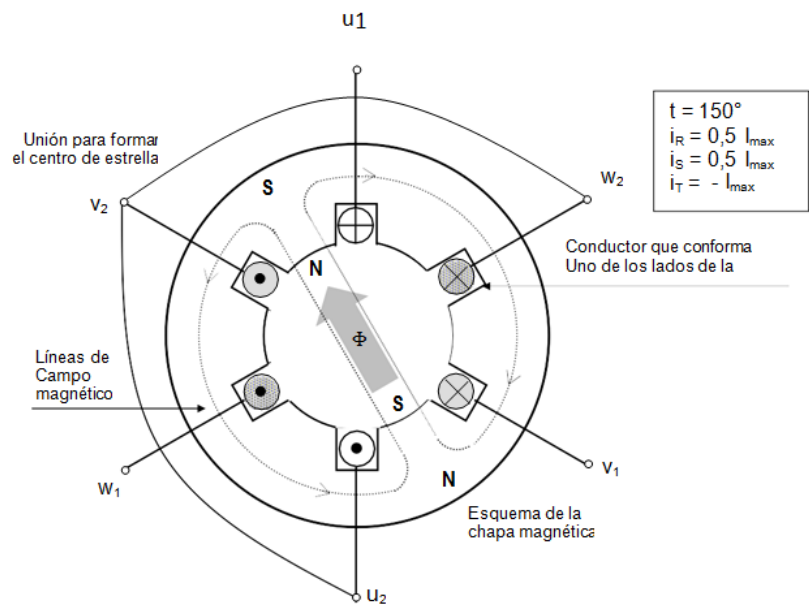


Figura 8. Detalle del estator y bobinas de una máquina rotante con dos polos magnéticos y con el sentido de las corrientes para $t = 150^\circ$

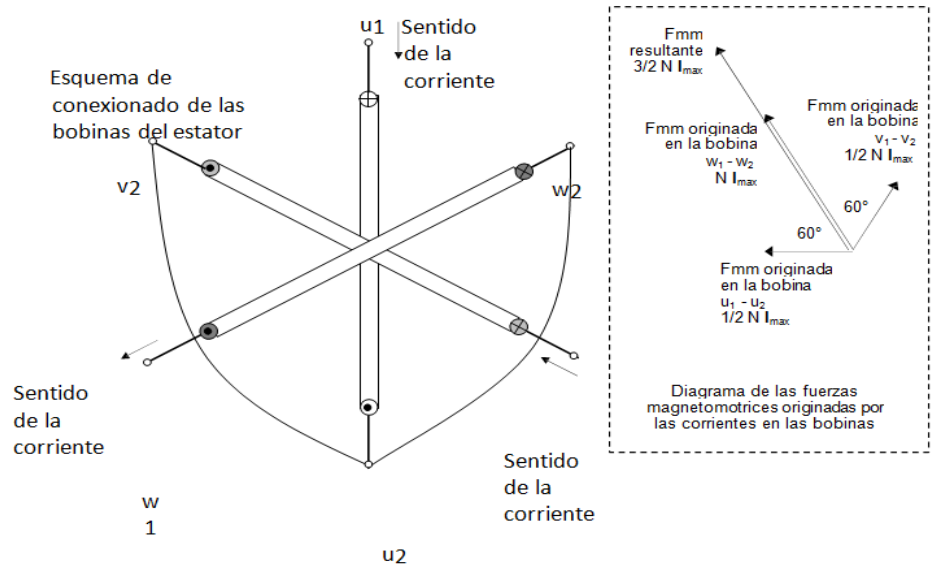


Figura 9. Disposición de las bobinas estatóricas y fuerzas magnetomotrices que originan para un ángulo eléctrico de 150°

2.2 Circuito equivalente de un motor de inducción.

Para operar, un motor de inducción depende de la inducción de voltajes y corrientes en su circuito rotor desde el circuito del estator (acción transformadora). Debido a que la inducción de voltajes y corrientes en el circuito del rotor es en esencia es una operación de transformación, el circuito de equivalencia de un motor de inducción se produce de forma muy similar al circuito de equivalencia del transformador. Un motor de inducción es llamado *máquina de excitación única* (a diferencia de la maquina síncronica de *excitación doble*) puesto que la potencia es suministrada sólo al circuito del estator. Dado que un motor no tiene circuito de campo independiente, su modelo no contendrá una fuente de voltaje interno como el voltaje interno generado E_A en una maquina síncronica.

Es posible deducir un circuito equivalente de un motor de inducción a partir del conocimiento de los transformadores y cuando está claro la variación de la frecuencia del rotor con la velocidad en los motores de inducción. El modelo del motor de inducción será desarrollado comenzando con el modelo del transformador y luego como tener en cuenta la frecuencia variable del rotor y otros efectos similares en el motor de inducción.

2.2.1 El modelo transformador de un motor de inducción

La Figura 10 muestra un circuito equivalente transformador, por fase, el cual presenta la operación de un motor de inducción. Como en cualquier transformador existe cierta resistencia y autoinductancia en los devanados primarios (del estator), la cuales deben ser representadas en el circuito equivalente de la máquina. La resistencia del estator se llama R_1 y la reactancia de dispersión será llamada X_1 . Estas dos componentes aparecen justo a la entrada en el modelo de la máquina. (Chapman, 2000)

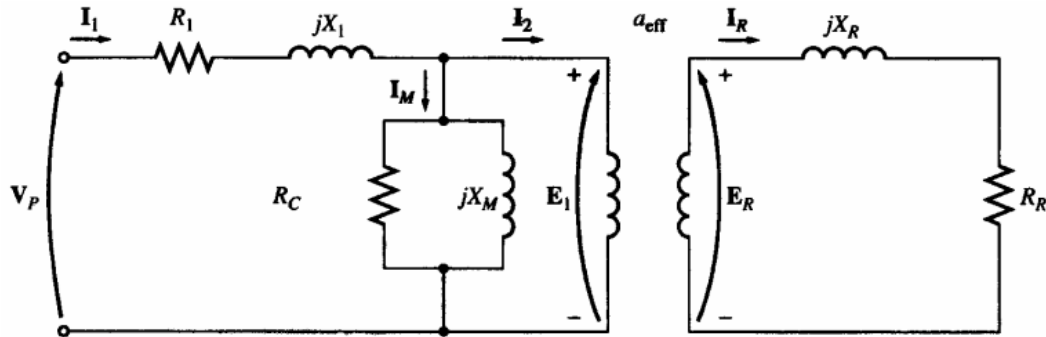


Figura 10. Modelo transformador de un motor de inducción con el rotor y el estator conectados por un transformador ideal de relación de vueltas a_{eff}

Así mismo como cualquier transformador con núcleo de hierro, el flujo de la máquina está relacionado con la integral del voltaje aplicado E_1 . La curva de la fuerza magnetomotriz contra el flujo del motor (curva de magnetización) para esta máquina es comparada con una curva similar para un transformador de potencia, en la Figura 11. Notando que la pendiente de la fuerza magnetomotriz-flujo del motor de inducción es mucho menos pronunciada de la curva de un buen transformador. Esto se debe a la existencia de un entrehierro en el motor de inducción, el cual aumenta grandemente a la reactancia del cambio del flujo y reduce, por tanto, el acoplamiento entre los devanados primario y secundario. Una mayor reluctancia ocasionada por el entrehierro significa que se requiere más alta corriente de magnetización para obtener un nivel de flujo dado. Entonces la reactancia de magnetización X_M en el circuito de equivalencia tendrá mucho menor valor (o la susceptancia B_M tendrá mucho mayor valor) que en un transformador nominal.

El voltaje primario del estator E_1 está acoplado al secundario E_R por un transformador ideal con relación efectiva de vueltas a_{eff} . La relación efectiva de vueltas a_{eff} es fácil determinar en un motor de rotor devanado, es básicamente la relación entre los conductores por fase del estator y los conductores por fase del rotor, modificando las diferencias dadas por los factores de paso y de distribución. En el caso de un motor de rotor de jaula de ardilla, es un tanto difícil ver con claridad a_{eff} debido a que no hay devanados distintos en este rotor. En todo caso, hay una relación efectiva de vueltas para el motor. (Chapman, 2000)

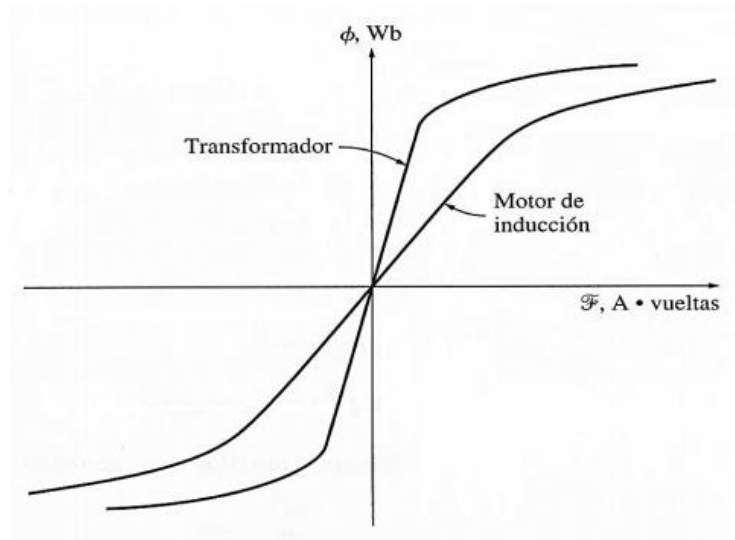


Figura 11. Curva de magnetización de un motor de inducción comparado con la de un transformador

2.3 La eficiencia en los motores de inducción

La eficiencia de un motor está definida como la relación entre la potencia que la máquina entrega en el eje P_2 y la potencia que toma de la red a la cual está conectado P_1 (Bojaca, 2010).

$$\eta = P_2/P_1 \tag{1}$$

Para el análisis de la eficiencia de los motores es común presentar esta expresión en la forma

$$\eta = (P_1 - P_T)/P_1 \tag{2}$$

Donde P_T son las pérdidas totales de la máquina.

Esta expresión, más que ser una transformación matemática de la primera, es una forma usual para evaluar la eficiencia. En efecto, las metodologías más comunes para la evaluación de la eficiencia se basan en cálculos separados de cada uno de los componentes de pérdidas, incluyendo posteriores correcciones debidas a factores influyentes como la temperatura ambiente, temperatura final de funcionamiento del motor, condiciones del sitio de prueba respecto a condiciones de referencia, etc.

Las componentes de pérdidas consideradas para la evaluación de la eficiencia de un motor son:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

- Pérdidas en los devanados del estator. Producidas por el efecto Joule en la resistencia de estos devanados.
- Pérdidas en los devanados del rotor (o jaula de ardilla). Producidas por efecto Joule y dependientes de la resistencia de estos devanados.
- Pérdidas en el hierro. Producidas por ciclos de histéresis y por corrientes de Foucault en el núcleo tanto del estator como del rotor. También se consideran como pertenecientes a este grupo otras pérdidas debidas a flujos magnéticos y corrientes de fuga que se presentan durante el funcionamiento en partes metálicas tales como la carcasa, los rodamientos y el eje.
- Pérdidas por fricción y ventilación. Corresponden a la suma de las pérdidas por fricción en los rodamientos, más la potencia utilizada para mover el ventilador propio que es, en la mayoría de los casos, la forma de refrigerar el motor.
- Pérdidas adicionales en carga (conocidas como “stray losses” en la literatura en inglés). Se presentan cuando el motor está bajo carga, y son debidas a los armónicos de flujo que generan pérdidas en los conductores y en partes metálicas.

La evaluación precisa de las distintas componentes de pérdidas exige:

- Un conocimiento claro del comportamiento del motor
- La disponibilidad de los medios de prueba y de medición que garanticen la precisión en las medidas
- Procedimientos claros para la ejecución de las pruebas que permitan la evaluación de pérdidas bajo consideración
 - Definición de condiciones de referencia que garanticen la reproducibilidad de los resultados
 - Cálculos adecuados de las correcciones para referir los resultados a las condiciones de referencia

Con el fin de garantizar estas condiciones, se han desarrollado a lo largo de los años distintas normas técnicas que buscan ser la base para estandarizar las metodologías de prueba, las condiciones de medición y los métodos de cálculo. Sin embargo, como el desarrollo tecnológico no ha sido igual en todas las regiones del mundo, se han desarrollado en paralelo distintas normas técnicas. Este es un fenómeno que se presenta en todos sistemas eléctricos, y obviamente los motores no son la excepción en este aspecto.

Por lo anterior, a continuación se hace un análisis detallado de la normativa más importante disponible para la evaluación de la eficiencia de los motores, y más concretamente de los motores de inducción, que son el foco de este trabajo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

2.4 Pérdidas en los motores de inducción.

Un punto muy importante por el cual se tiene muy presente en el rendimiento de un motor son las pérdidas que se producen en el mismo. En un motor se pueden clasificar las pérdidas como (Cortés, Deprez, Driese, & Pérez, 2008):

- Pérdidas eléctricas (también llamadas pérdidas joule): Estas son expresadas como I^2R , y por consiguiente se incrementan rápidamente con la carga del motor. Estas pérdidas aparecen en forma de calor consecuencia de la resistencia eléctrica contenida en los devanados de las bobinas del estator y las barras conductoras del rotor entre otras.
- Pérdidas magnéticas: Estas se producen en las láminas de acero del estator, del rotor y son debidas al ciclo de histéresis y corrientes de Foucault.
- Pérdidas mecánicas: Estas pérdidas son debidas a la fricción entre rodamientos y a las pérdidas por resistencia del aire al giro del ventilador y otros elementos rotativos del motor.
- Pérdidas adicionales en carga: Estas pérdidas están relacionadas con la carga y generalmente varían con el cuadrado del par de salida. La naturaleza de estas pérdidas son muy complejas

Al realizar la investigación para el desarrollo de la guía de pruebas de eficiencia de motores de inducción en el Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia - Parque I, se busca obtener información suficiente y detallada con el fin de determinar los lineamientos establecidos por las normas nacionales e internacionales, que permitan realizar una comparación entre las normas existentes y así establecer un método para la evaluación de la eficiencia y la potencia consumida en los motores de inducción. A continuación se realiza una breve descripción de las normas nacionales e internacionales vigentes aplicadas a la evaluación de la eficiencia energética en motores de inducción.

2.5 Marco normativo

La experiencia en el desarrollo, aplicación, pruebas y demás aspectos técnicos de los motores están registrados en normas técnicas, las cuales se han construido con el aporte de muchos técnicos e investigadores alrededor del mundo.

De manera similar a como se ha dado el desarrollo de otros equipos y sistemas de ingeniería, en el caso de los motores existen dos tendencias tecnológicas: Por un lado la línea europea cuyos fundamentos y avances se consignan en las normas IEC (International Electrotechnical Commission), y por otro lado el desarrollo norteamericano que da origen a las normas NEMA (National Electrical Manufacturers Association) e IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

2.5.1 IEC 60034-2-1 (Normativa Europea):

Esta norma incluye varios métodos y procedimientos para la determinación del rendimiento, estos métodos pueden ser subdivididos en dos categorías (Guardiola de Cabo, 2008):

- Método directo: La potencia adsorbida y la potencia suministrada en el eje del motor son medidas directamente.
- Método indirecto: Se mide indirectamente la potencia absorbida y las pérdidas del motor son determinadas de forma separada por el cálculo de la potencia útil.

Los requisitos de esta norma son:

- Un ensayo en vacío para medir las pérdidas constantes (pérdidas en hierro, pérdidas por rozamiento y ventilación)
- Las pérdidas joule en el estator son evaluadas utilizando la resistencia medida en corriente continua y corregida a la temperatura de referencia (esta temperatura depende de la clase de aislamiento de la maquina independiente de la temperatura real alcanzada durante los ensayos).
- Las pérdidas joule en el rotor quedan definidas como:

$$P_{joule_rotor} = sX(P_{absorbida} - P_{hierro} - P_{joule_estator}) \tag{3}$$

- Las pérdidas adicionales son asumidas como el 0.5% de la potencia absorbida de la carga nominal.

2.5.2 IEEE 112 B (Normativa Americana): Es una de las principales normas internacionales para ensayos de máquinas eléctricas, sus requisitos particulares son los siguientes (Galindo Ramírez, 2010):

- Ensayo térmico a la carga nominal: la máquina trabaja a la carga nominal hasta alcanzar la temperatura específica del motor. A la final de este ensayo debe medirse la resistencia del estator.
- Las pérdidas adicionales obtenidas a partir del ensayo en carga se corrigen mediante una regresión lineal.
- Las correcciones más significativas, para el cálculo del rendimiento, son el deslizamiento, las pérdidas adicionales, el par y la resistencia en el estator en cada punto.

IEEE 112 E: Este método de ensayo mide la entrada de energía y determina la salida de energía por la sustracción de las pérdidas totales en la entrada. La pérdida total es igual a la suma de las pérdidas por estator y rotor corregida a la temperatura especificada para la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

corrección de resistencia, perdidas por núcleo, fricción, pérdidas por resistencia al viento y perdidas por la carga. En esta norma se tienen en cuenta los siguientes requerimientos:

- Las pérdidas adicionales nominales se asumen como un 1.8% de la potencia útil nominal. Para el resto de puntos, se tiene en cuenta una relación de corrientes.
- Las corrientes más significativas, para el cálculo del rendimiento, son el deslizamiento, las pérdidas adicionales y la resistencia del estator en cada punto.

2.5.3 IEC61972 (Normativa Europea):

Esta norma tiene una estructura similar a la IEEE 112, y sus dos métodos (método 1 y método 2) presentan las siguientes diferencias significativas (Maruszczuk, Lhenry, Helinko, & Korendo, 2009):

- Ensayo en vacío: Se realiza una corrección de las tensiones en vacío y dos rectas de separación de pérdidas.
- En el método 2 de esta norma, se calculan las pérdidas adicionales nominales mediante una función logarítmica. Para el resto de puntos se tiene una relación de corrientes.

2.5.4 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 3477:

Esta norma tiene por objeto definir los métodos para la determinación de la eficiencia a partir de los ensayos, e igualmente especificar los métodos que permiten determinar las pérdidas (ICONTEC, 2008). La presente norma se aplica a las máquinas de corriente continua, sincrónicas y de inducción de corriente alterna, de todos los tamaños, que son objeto de la NTC 2805 (IEC 60034-1) esta norma es idéntica (IDT) por traducción de la IEC 60034-2-1:2007.

2.5.5 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 5983:

Esta norma define la forma en que se determina y se expresa la eficiencia nominal, mínima asociada y cuáles son los valores mínimos, con el objeto de procurar el uso racional de los recursos energéticos no renovables, se establece el método de prueba para su evaluación, y la especificación de marcado de la eficiencia nominal en la placa de características de los motores eléctricos de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, enfriados con aire, en potencia nominal de 0,180 kW hasta 1,500 kW, de una sola frecuencia de rotación, de 2 polos, 4 polos o 6 polos, de fase dividida o con condensador de arranque, abierta o cerrada. Se excluyen los motores eléctricos que requieren de equipo auxiliar o adicional para su enfriamiento (ICONTEC, 2013).

2.5.7 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 5111:

Esta norma tiene por objeto evaluar la eficiencia de los motores eléctricos de acuerdo con normas IEEE o normas IEC, debido al uso de ambas prácticas en nuestro medio se han elaborado las Normas Técnicas Colombianas que establecen los métodos de ensayo para evaluar la eficiencia para cada una de ellas, la presente norma corresponde al método que tiene como base la norma IEEE 112 (ICONTEC, 2002).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

3. METODOLOGÍA

El desarrollo de este proyecto se encuentra dividido en tres etapas como se muestra a continuación:

En la primera etapa, se puede encontrar el marco teórico, se analizó el principio de funcionamiento, modelo, tipos, y pérdidas en los motores de inducción. Adicionalmente, se realizó una búsqueda de la normatividad actual nacional e internacional, asociada a la evaluación de la eficiencia energética en motores de inducción. Con dicha información, se realizó un análisis comparativo, que permitió la identificación de metodologías y equipos necesarios. Adicionalmente, se identificaron los tipos de motores de inducción más utilizados en la industria local, con el fin de evaluar las posibles necesidades actuales a nivel regional.

En la segunda etapa, se realizó una evaluación de los equipos disponibles en el laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia – Parque I, a la luz de las normas vigentes que rigen la evaluación de eficiencia energética en motores de inducción. Con dicha información y partiendo del análisis comparativo de la primera fase, se realizó la selección de la prueba y la norma base para el desarrollo de la guía. La selección dependió en gran medida del tipo de motor más utilizado a nivel local. Y adicionalmente, se identificaron los instrumentos de medida faltantes, necesarios para el desarrollo de la prueba, y se anexa equipos sugeridos con sus especificaciones técnicas, seleccionados bajo los requerimientos de la norma a seguir.

Por último, se realizó la construcción de la guía para pruebas de eficiencia energética en motores de inducción, que explica detalladamente el desarrollo de la prueba y que expresa claramente la metodología para la toma de mediciones.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tal y como se mencionó en el numeral 2.5 del marco teórico, las principales normas que rigen la evaluación de eficiencia energética en motores de inducción son la IEEE 112 (*Standard Test Procedure for Polyphaser Induction Motors and Generators*) y la IEC 60034-2-1 (*Rotating Electrical Machines*). Estas normas son tomadas como referencia en las normas colombianas.

Con respecto a las normas IEEE 112 e IEC 60034-2-1, las pruebas de ensayo para motores de inducción varían tanto en las metodologías definidas, como en la exactitud de algunos de los instrumentos de medida requeridos y en los procedimientos de prueba. Por lo tanto, se realizó un análisis comparativo entre estas dos normas, que se mostrará en el numeral 4.1.

Luego en el numeral 4.2, se encontrará la revisión de las especificaciones técnicas de los equipos de medición del laboratorio de energía eléctrica y potencia del Parque I, requeridos para realizar pruebas de eficiencia energética por las dos normas.

Seguidamente en el numeral 4.3, se presentará el estudio de mercado realizado con algunos de los proveedores de la industria local de motores de inducción, en el que se evidencia tipo y tamaño de motores más vendidos. Este resultado se tomó como base para la selección de la norma y método a seguir, en el desarrollo de la guía de evaluación de eficiencia.

Para finalizar, en el numeral 4.4 se realizó la selección de la norma que será utilizada para desarrollar la guía, con base al análisis de los numerales 4.1 a 4.3.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

4.1 Análisis comparativo de las principales normas internacionales

Inicialmente, para las dos normas seleccionadas, se realizó una comparación de algunos requerimientos generales necesarios para la ejecución de las pruebas, dicha información es muestra continuación en la Tabla 2.

Requerimiento	IEEE 112	IEC 60034-2-1
Fuente de alimentación	<ul style="list-style-type: none"> • El factor de distorsión de armónicos de tensión (THD), no debe exceder 0,05. • El desbalance de tensiones en el sistema trifásico no debe exceder 0,5%. • La frecuencia no debe desviarse más de $\pm 0,1\%$ de la frecuencia nominal. Si se presentan variaciones de frecuencia durante las pruebas, estas no deben exceder 0,33% de la frecuencia promedio. 	<ul style="list-style-type: none"> • El factor de armónicos de voltaje (HVF), no debe exceder 0,03. • El desbalance de voltaje del sistema trifásico debe ser tal que no exceda en 1,5%. • La frecuencia no debe desviarse más de $\pm 0,3\%$ de la frecuencia nominal.
Condición de temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • La temperatura ambiente de referencia para presentar todos los resultados es de 25°C. • Se define una temperatura de los devanados como “temperatura especificada” a la cual se deben referir todos los cálculos de las componentes de pérdidas que dependen de los valores de resistencia (I^2R). 	<ul style="list-style-type: none"> • La temperatura ambiente de referencia es 25°C. • Aunque no define una temperatura con el nombre de “temperatura especificada”, si se establece el método de ensayo para obtener la temperatura de estabilización con carga nominal.

Tabla 2. Comparación de requerimientos generales

4.1.1 Métodos de ejecución de pruebas

Las dos normas definen varios métodos para determinar las pérdidas y la eficiencia en los motores de inducción. Esta comparación se centra particularmente en los métodos de entrada y salida que son ampliamente utilizados en la industria (Bojaca, 2010).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

A continuación, en la Tabla 3, se realiza una comparación en la secuencia de ejecución de las pruebas con ambas normas.

Norma	Orden de las pruebas
IEEE 112 establece un orden específico para la ejecución de las pruebas que conforman el método.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Medición de la resistencia de devanados del estator en frío. 2) Prueba de calentamiento con carga nominal. 3) Prueba bajo carga. 4) Prueba sin carga (o de vacío).
IEC 60034-2-1 aunque las pruebas son las mismas, e igualmente se indica una secuencia de pruebas pero esta es diferente.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Prueba sin carga (o de vacío). 2) Prueba de calentamiento con carga nominal. 3) Prueba de determinación de curva de carga. <ul style="list-style-type: none"> • No está definido el orden de ejecución de las pruebas; por ejemplo esta norma ofrece la opción de realizar la prueba de vacío después de la de carga. • En cuanto a la medición de la resistencia, de los devanados del estator no se indica nada expresamente con respecto a qué posición ocupa esta prueba dentro de la secuencia de pruebas.

Tabla 3. Secuencia de ejecución de las pruebas

Con el fin de realizar un análisis comparativo más profundo se muestra a continuación el objetivo de cada prueba mencionadas anteriormente de ambas normas en estudio.

4.1.2 Medición de resistencia de devanados en frío

IEEE 112 - Método B

Se mide la resistencia de los devanados a temperatura ambiente y se registran los valores de resistencia y de temperatura ambiente.

IEC 60034-2-1

Explícitamente no establece la medición en frío. Solamente hace referencia a la medición de la resistencia al final de la prueba de calentamiento. Establece que la resistencia se debe referir a una temperatura estándar del medio ambiente de 25°C.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

4.1.3 Prueba de calentamiento con carga nominal

IEEE 112 - Método B

Se realiza la prueba cargando el motor bajo condiciones nominales, usando para ello un freno de potencia. Con base en este ensayo se determina la “temperatura especificada” de la máquina. Esta es la temperatura a la cual se debe calcular los valores de eficiencia.

La temperatura específica se determina por el incremento de temperatura durante esta prueba, más 25°C.

La temperatura especificada se corrige igualmente por diferencia de altura sobre el nivel del mar entre el sitio de prueba.

IEC 60034-2-1

Con respecto a esta prueba esta norma no tiene en cuenta corrección por altura sobre el nivel del mar.

4.1.4 Prueba bajo carga

IEEE 112 - Método B

El motor se carga con potencia variable, se mide el valor con la ayuda de un dinamómetro. La temperatura del devanado debe estar dentro un rango de ± 10 °C alrededor de la temperatura más alta registrada durante la prueba de calentamiento con carga nominal. Cuando sea necesario se hace una prueba de corrección de dinamómetro. Se toman medidas en seis condiciones de carga comenzando en 150% y terminando en 25% de la carga nominal.

IEC 60034-2-1

La temperatura del devanado debe estar dentro de un rango de ± 5 °C alrededor de la temperatura más alta registrada durante la prueba de calentamiento con carga nominal.

Se toman medidas en seis condiciones de carga comenzando en 150% y terminando en 25% del valor nominal. Se mide la resistencia antes de la mayor condición de carga y después de la menor. Para las condiciones de carga por encima del 100% de la nominal se usa la resistencia medida antes de la mayor carga y para las condiciones de carga inferiores a 100% de la nominal, se toma una variación lineal del valor de la resistencia en función de la carga entre los dos valores de resistencia medidos. Sin embargo se da la posibilidad de tomar las medidas de temperatura por medio de un detector concentrado en el bobinado.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

4.1.5 Prueba sin carga (o en vacío)

IEEE 112 - Método B

Se realiza la prueba comenzando con 125% de la tensión nominal y disminuyendo su valor hasta que una disminución adicional de la tensión produzca un incremento en la corriente.

Si inmediatamente antes de esta prueba se ha realizado la prueba de calentamiento, no es necesaria una estabilización de las pérdidas en los rodamientos. En caso contrario el motor se deja rodando sin carga hasta que se establezca el valor de la potencia de entrada (que las lecturas no varíen más de 3% entre dos mediciones hechas con intervalos de 30 minutos).

IEC 60034-2-1

No hay diferencias esenciales con respecto a la norma IEEE 112. Lo único adicional que se menciona es la cantidad de condiciones de carga que deben medirse indicando, además, que la tensión aplicada durante la prueba debe llegar aproximadamente hasta el 20% de la tensión nominal.

4.1.6 Cálculo de las pérdidas de fricción y ventilación

Como se menciona en el numeral 2.5 del marco teórico, las pérdidas son variables importantes que determinan el rendimiento de un motor de inducción, a continuación se compara el método de ambas normas para hallar las principales pérdidas que produce el mismo motor.

Con respecto a la Norma IEEE 112- Método B, el valor se determina a partir de la prueba sin carga. Para cada valor de tensión aplicada se hace la resta entre la potencia de vacío y las pérdidas en el cobre del estator I^2R se dibuja una gráfica con estos valores en función de la tensión al cuadrado (deben utilizarse los 3 puntos de menor valor). Si se extrapola esta curva hasta tensión cero, el punto de corte con el eje de potencia corresponde al valor de las pérdidas de fricción y ventilación. Para la norma IEC 60034-2-1 no hay diferencia en la metodología para calcular pérdidas de fricción y ventilación.

En la Tabla 4, se muestra el método y se realizó la comparación de ambas normas en estudio para la determinar la pérdida en el núcleo, estator y rotor.

Componente	IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
Núcleo	<p>Las pérdidas (P_h) en el núcleo dependen del voltaje aplicado, es necesario encontrarlas solamente para el punto de operación normal del motor.</p> $P_h = P_e - P_s - P_{fv}$ <p>Dónde: P_e: potencia de entrada, en vacío P_s: pérdidas en el estator, en vacío P_{fv}: pérdidas por fricción y ventilación</p>	<p>Se deben determinar valores de pérdidas en el núcleo para voltaje entre el 60% y el 125% del voltaje nominal. Recomienda que las caídas de tensión en la resistencia del devanado se calculen con los valores de resistencia obtenidos en la prueba de carga; con los valores de voltaje obtenidos.</p>
Estator	<p>La resistencia R con la cual se calculan estas pérdidas, se obtiene con la ecuación de variación de la resistencia en función de la temperatura</p> $R/R_{TR} = (t_A + k)/(t_{TR} + k)$ <p>Donde R_{TR}: Valor de la R al momento del corte en la prueba de calentamiento con carga nominal. t_{TR}: Valor de la T al momento del corte en la prueba de calentamiento con carga nominal. k: Constante de conductividad del material ($k = 234,5$ para el cobre; $k = 225$ para el aluminio) t_A: Valor de temperatura para cada condición en la prueba de carga y se calcula así: $t_A = (t_{TR}/t_{TD}) \times tt$ t_{TD}: Temperatura medida mediante al sensor incrustado. tt: Temperatura medida en cada condición de la prueba de carga.</p>	<p>Se calcula inicialmente un valor no corregido de pérdidas para cada condición de carga: $P = 1.5 \times I^2 R$ I: corriente de línea R: es la resistencia medida en la prueba de calentamiento con carga nominal. Posteriormente este valor de pérdidas se corrige a la temperatura de referencia (25 °C).</p>
Rotor	<p>La pérdida en el rotor (P_r) se calcula mediante la expresión:</p> $P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \times s$ <p>P_1: potencia de entrada P_s: pérdidas $I^2 R$ en el estator P_{fe}: pérdidas en el núcleo S: deslizamiento</p>	<p>No hay diferencia, el cálculo se hace de la misma manera.</p>

Tabla 4. Comparación en el cálculo de las pérdidas en el motor.

En cuanto al cálculo de la eficiencia ambas normas calculan la eficiencia con la expresión:

$$\eta = (P_1 - P_T)/P_1$$

η = eficiencia

P_1 = Potencia de entrada

P_T = Pérdidas totales

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

Complementando las pruebas citadas en el numeral 4.1.1, existen algunas diferencias entre las dos normas en sus definiciones en la realización de pruebas con carga y sin carga.

Para la IEEE 112 Método B especifica las siguientes condiciones.

- a) Cuando la potencia de entrada varía dentro del 3% medido a dos sucesivos intervalos de 30 min sin carga aplicada, se supone que es el equilibrio térmico. Sin carga la prueba se lleva a cabo desde el 125% de la tensión nominal, hasta el punto de tensión donde la reducción de la tensión aumentaría aún más la actual, sin número determinado de puntos de pruebas totales.
- b) Cuando la medida de la temperatura de la máquina varía dentro de 1°C en intervalos de 30 min con carga nominal aplicada, se alcanza el equilibrio térmico. La calificación de las pruebas de carga parciales son posteriores a las seis lecturas de disminución del par desde 150% hasta el 25% del par nominal.
- c) Es aconsejable tomar varias lecturas en cada punto en periodos cortos de tiempo de tensión o de carga y promediar los resultados para un valor más exacto.
- d) La resistencia del devanado del estator se derivan de la resistencia de referencia y la temperatura real, se elevan en condiciones sin carga y con carga. Los sensores de temperatura se pueden montar en dos conexiones finales en el bobinado, en la ranura del estator o enterrados en la laminación núcleo aunque se prefiere instalar en la parte más caliente de la máquina.

Para la IEC 60034-2-1 especifica las siguientes condiciones.

- a) Cuando se asume el equilibrio térmico la prueba de carga se toma en al menos cuatro puntos igualmente espaciados entre 60% y 125% (incluyendo 100%) y al menos tres puntos espaciados entre 20% y 50% del voltaje nominal.
- b) Cuando la medida de la temperatura varía entre 2°C/h con aplicación de carga nominal, se alcanza el equilibrio térmico. Cuatro puntos de carga se leen aproximadamente equidistantes entre 25% y 100% (incluyendo 100%) y dos valores igualmente espaciados por encima de 100% y no superior a 150% de la carga nominal.
La clasificación de las pruebas de carga parcial se lleva a cabo desde el más alto hasta el más bajo punto de carga en orden descendente. Estas pruebas deben realizarse lo más rápidamente posible para minimizar los cambios de temperatura en el motor.
- c) Preferiblemente, la temperatura del devanado está determinada por la medición directa de la prueba de carga nominal utilizando el menor tiempo posible por el procedimiento de extrapolación. Después se procesa el punto de carga más bajo, se registra otra lectura de la temperatura del bobinado. Las dos lecturas se utilizan para predecir la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

resistencia de los devanados para todas las otras cargas. Alternativamente, la temperatura de bobinado también se puede medir con sensores de temperatura, similar a los procedimientos IEEE. Sin embargo, no existe una definición donde los sensores deben estar unidos para obtener la medida de la temperatura del devanado.

Las principales similitudes y diferencias de IEEE 112 e IEC 60034-2-1 se resumen en la Tabla 5.

Características	IEEE 112-B	IEC 34-2-1
Separación de pérdidas	✓	✓
Sensor de temperatura	✓	X
Referencia temperatura ambiente	25°C	25°C
Resistencia de bobinado de estator corregida	✓	✓
Deslizamiento corregido	✓	✓
Pérdida en el núcleo con caída de tensión compensada	X	✓
El análisis de regresión lineal de pérdida	✓	✓
Coefficiente de correlación de pérdida	0.9	0.95
Medidor de toque corregido	✓	✓
Dinamómetro corregido	X	✓
Potencia de salida corregida	✓	✓

Tabla 5. Lista de funciones de IEEE 112 e IEC 60034-2-1

4.1.7 Instrumentación de medición

Sin lugar a dudas, la precisión de los instrumentos juega un papel clave en la medición. Se muestra en la Tabla 6, la exactitud de los instrumentos especificada en cada norma. Se puede observar que la nueva norma IEC es similar en cuanto a precisión a la IEEE, y por lo tanto, representa una mejora significativa en su versión anterior de la norma IEC.

Sin embargo, el uso de un instrumento que tiene una precisión similar no produce necesariamente resultados similares. Las diferencias surgen en el uso diversas metodologías y procedimientos de prueba definidos en las normas y la participación humana en la medición. En la Tabla 6, se indican la exactitud de la medida requerida para las variables temperatura y velocidad, mientras que para las demás variables se especifica la clase de exactitud requerida por el instrumento de medida.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

Variable	IEE112	IEC34-2-1
Voltaje	0.5	0.2
Corriente	0.2	0.2
Potencia	0.2	0.2
Torque	0.2	0.2
Velocidad	1 rpm	1 rpm
Frecuencia	0.1	0.1
Resistencia	0.2	0.2
Temperatura	1°C	1°C

Tabla 6. Exactitud de los instrumentos de medida

Investigando las incertidumbres en la medición de la eficacia del motor de inducción en determinada prueba, se puede estimar la influencia relativa de cada origen de error de las pérdidas y la eficiencia. Se utiliza un método de evaluación basado en la perturbación (RPBE) que incorpora todas las fuentes de error significativas y que puede utilizarse para evaluar la precisión de los cálculos de las pérdidas y de la eficiencia en la Tabla 6, se muestra la estimación de la precisión de los instrumentos y la eficiencia en porcentaje.

4.1.8 Incidencia de los errores humanos en la pruebas en ambas normas.

Los errores humanos surgen de la interpretación de los procedimientos de prueba, la toma de las mediciones y en el resultado de las prueba. Por ejemplo, el error en la medición surge cuando el instrumento no se utiliza correctamente, esto se atribuye a errores humanos. Sin embargo, la aplicación de una norma de ensayo sería relativamente más sencilla si todo el mundo usara exactamente los mismos equipos de medición, se tendría la misma capacidad básica de prueba y de alimentación, con relación a los motores a evaluar. Desafortunadamente, esto no ocurre en la vida real y se hace imposible definir completamente un procedimiento para pruebas dentro de un norma, aunque, las definiciones del procedimiento se hacen lo más estrictas posibles (Cao, 2009).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

4.2 Evaluación de los instrumentos de medida (Laboratorio Energía Eléctrica y Potencia)

Para realizar de una manera correcta los ensayos, se deben tener en cuenta el rango de los instrumentos de medida seleccionados para un menor porcentaje de error en la medida, ya que la exactitud del instrumento es expresada generalmente como un porcentaje de la escala total. El margen de alcance o intervalo de medición del instrumento escogido debe ser tan bajo como sea posible.

Se evaluaron los instrumentos disponibles en el laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia – Parque I, con base a lo requerido en las normas IEEE 112-B y IEC 60034-2-1. A continuación en la Tabla 7, se muestran los criterios de evaluación por variable.

Instrumentación	Criterio de evaluación
Transformador de medida (fuente)	Los errores de los transformadores utilizados no deben ser mayores que $\pm 0.5\%$ para pruebas generales. Cuando los transformadores de medida y los instrumentos para la medición del voltaje, corriente, o potencia son calibrados como un sistema, los errores del sistema no deben ser mayores que $\pm 0.2\%$ de la escala total.
Voltaje	Cada uno de los voltajes línea a línea debe ser medido con los cables de señal conectados a los terminales de la máquina. Si las condiciones locales no permitirán tales conexiones, la diferencia entre el voltaje en los terminales de la máquina y el punto de medición debe ser evaluada y las lecturas deben ser corregidas. Los instrumentos de medición deben tener una clase de exactitud de 0,2.
Corriente	Las corrientes de línea para cada fase del motor deben ser medidas, y el valor del promedio aritmético debe ser utilizado en el cálculo del desempeño de la máquina a partir de los datos de la prueba. Los instrumentos de medición deben tener una clase de exactitud de 0,2
Potencia	Los errores de la instrumentación utilizada para medir el par de torsión mecánico no deben ser mayores que $\pm 0.2\%$ de la escala total.
Velocidad y deslizamiento	Cuando se mide la velocidad, la instrumentación utilizada debe tener un error no mayor de ± 1.0 rpm de la lectura.
Resistencia	Los instrumentos deben llevar un registro de calibración, dentro de los 12 meses de la prueba, indicando límites de error no mayores de $\pm 0.2\%$ de plena escala.
Temperatura	La instrumentación para medir temperatura del devanado debe tener una exactitud de $\pm 1^{\circ}\text{C}$

Tabla 7. Criterios para la evaluación de instrumentos

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

A continuación, se indican las especificaciones técnicas de los instrumentos de medida, con los cuales cuenta el laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia – Parque I para realizar los ensayos de eficiencia.

Información General	
Nombre:	Multímetro Serie: 179
Marca:	FLUKE Tipo: Digital
Datos Metrológicos	
Rango de medición:	0 ~ 1.000 Alcance: 1.000 V
Resolución:	0,1 mV Unidad de medida: V
Precisión:	$\pm (1,0\% + 3)$

- El multímetro cumple para realizar las mediciones de tensión, debido a que se encuentra en el rango de exactitud requerida (Fluke, 2001).

Información General	
Nombre:	Pinza amperimétrica Serie: 325
Marca:	FLUKE Tipo: Digital
Datos Metrológicos	
Rango de medición:	40 ~ 400 Alcance: 400 A
Resolución:	Unidad de medida: A
Precisión:	$2\% \pm 5$

- La pinza amperimétrica cumple para realizar las mediciones, debido a que se encuentra en el rango de exactitud requerida (Fluke, 2012).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

Información General	
Nombre: <u>Fuente de voltaje</u>	Serie: _____
Marca: <u>EPICO</u>	Tipo: _____
Datos Metrológicos	
Rango de tensión: <u>0-500VAC</u>	Alcance: <u>500 V</u>
Corriente de salida: <u>30 A</u>	Unidad de medida: <u>V/A</u>
Potencia nominal: <u>23.4kVA</u>	

- La fuente de voltaje cumple con el suministro de tensión, para la evaluación de los motores de inducción trifásicos a verificar.

Información General	
Nombre: <u>Multímetro</u>	Serie: <u>179</u>
Marca: <u>FLUKE</u>	Tipo: <u>Digital</u>
Datos Metrológicos	
Rango de medición: <u>-40 ~ 400</u>	Alcance: <u>400°C</u>
Resolución: <u>0,1 °C</u>	Unidad de medida: <u>C</u>
Precisión: <u>± (1,0% + 10)</u>	

- El multímetro cumple para realizar las mediciones de temperatura, debido a que se encuentra en el rango de exactitud requerida (Fluke, 2001).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

Cabe aclarar que para evaluar la eficiencia por cualquiera de los métodos es necesario contar con un dinamómetro y un tacómetro. A continuación se realiza una recomendación de los equipos que se podrían utilizar para las pruebas:

- Dinamómetro con alcance mínimo de 10 HP, ver Figura 12. Un equipo que cumple con las especificaciones de ambas normas puede ser el dinamómetro MIDWEST 3HS.



Figura 12. Dinamómetro MIDWEST 3HS

- Tacómetro portátil de mano se recomienda el ilustrado en la Figura 13:



Figura 13. Tacómetro DT-2268

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

4.3 Selección de motores

Con el fin de determinar los motores más utilizados en la industria local, se realizó una investigación entre algunos de los proveedores locales de motores de inducción del Valle de Aburrá, obteniendo como resultado que los motores más vendidos o que en el mercado fueron más usados a lo largo de los últimos dos años fueron los siguientes mostrados en Tabla 8:

N°	Descripción	rpm	Potencia	Polos	Referencia	Promedio Vendido (unid)
1	MOTOR WEG 3F	1800	2 HP	4P	PG002183CSA	196
2	MOTOR WEG 3F	1800	1 HP	4P	PG001183CSA	178
3	MOTOR WEG 3F	1800	3 HP	4P	PG003183CSA	175
4	MOTOR WEG 3F	1800	5 HP	4P	PG005183CSA	164
5	MOTOR WEG 3F	1800	7.5 HP	4P	PG007183CSA	159
6	MOTOR WEG 1F	1800	1 HP	4P	PG001181HSB	130
7	MOTOR WEG 1F	1800	3 HP	4P	PG003181GSB	120
8	MOTOR WEG 1F	1800	2 HP	4P	PG002181HSB	120
9	MOTOR WEG 1F	1800	5 HP	4P	PG005181GSA	118
10	MOTOR WEG 1F	1800	1/2 HP	4P	PG.50181HSB	118

Tabla 8. Promedio de motores vendidos

Se puede observar que se venden en mayor proporción los motores trifásicos, con potencias que varían entre 1 HP y 10 HP, a 1800 rpm. Con respecto a este tipo de motores, se enfocarán las pruebas de eficiencia en el laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia – Parque I.

4.4 Selección de la norma.

Con base al análisis realizado en el numeral 4.1 se determina que las principales diferencias de las normas son:

- Las dos normas presentan algunas diferencias en la determinación de las pérdidas en el conductor del estator y las pérdidas en el núcleo, pero no tienen diferencia en la determinación de la pérdidas en el conductor del rotor, ni en las pérdidas por fricción y rozamiento; en comparación de la IEEE 112 con la norma IEC, se puede concluir que el método B de la IEEE 112, proporciona valores más precisos mediante el desarrollo de cada una de las pruebas que indica esta norma para determinar la eficiencia.
- En la norma IEC 60034-2-1, no hay precisión en cuanto a la secuencia en la que se deben ejecutar las diferentes pruebas; sin embargo, se puede adoptar la misma secuencia establecida en la norma IEEE 112, caso en el cual pueden ser comparables los resultados obtenidos con la aplicación de las dos normas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

- Las condiciones de prueba relacionadas con la característica de tensión y las especificaciones de calidad de los instrumentos de medida, son muy similares en las dos normas; aunque en algunas características, aparentemente cada una de las normas presenta dichas condiciones y especificaciones de maneras diferentes.

Con base a lo descrito anteriormente, se seleccionó como norma base la IEEE 112 método B.

Adicionalmente se pudo verificar que los instrumentos del laboratorio cumplen con la precisión y la exactitud requerida, dado que se encuentra en los rangos estimados para las mediciones mostradas en la Tabla 7.

Se pudo evidenciar en la Tabla 8, que los motores más utilizados localmente son motores trifásicos, que operan a 1800 rpm, de 1 HP hasta 10 HP y 4 Polos, con base en esta información fueron seleccionados como foco para la ejecución de pruebas de eficiencia en este tipo de máquinas eléctricas.

4.5 Metodología para la elaboración de la guía de ensayo para el cálculo de la eficiencia de los motores.

El método de ensayo para determinar el rendimiento en los motores se realiza mediante las pérdidas segregadas, es decir, a partir de mediciones y cálculos, se determinan las pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator y del rotor; las pérdidas del núcleo, las pérdidas por fricción y ventilación.

Condiciones iniciales del método B de ensayo de la norma IEEE 112.

La frecuencia eléctrica de alimentación para todas las pruebas debe de ser la frecuencia eléctrica nominal que se indica en la placa de datos del motor. No debe de variar más de $\pm 0,5\%$ de este valor.

Todos los niveles de tensión deberán ser leídos en los terminales del motor. El nivel de tensión de la fuente no deberá variar en más de $\pm 0,5\%$ del valor nominal dado en las placas del motor, con un desbalance máximo de $\pm 0,5\%$. El porcentaje del desbalance es igual a 100 veces la desviación máxima de la tensión eléctrica de cada fase con respecto a la tensión eléctrica promedio, dividida entre la tensión eléctrica promedio.

La distorsión armónica total de la onda de tensión eléctrica no debe ser mayor al 5%.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

4.5.7 Procedimiento del ensayo

Antes de realizar cualquier prueba al motor se realiza la medición de la resistencia de referencia del estator y de la terminal de referencia. Antes de energizar el motor de prueba, se mide la resistencia entre las terminales de los devanados del estator, se mide la temperatura en los devanados del estator y se mide la temperatura ambiente.

Se designa como resistencia de referencia R_i aquella con el valor más cercano al promedio de las tres mediciones realizadas en las diferentes terminales del estator y como terminal de referencia se designa la de la resistencia de referencia.

Las siguientes pruebas se realizan al motor de forma cronológica a como son presentadas a continuación.

4.5.8 Prueba de temperatura con carga nominal

Se realiza prueba de equilibrio térmico para determinar la resistencia y temperatura de los devanados del motor operando a plena carga. Esta prueba consiste en operar el motor a plena carga hasta que la diferencia entre la temperatura ambiente y la del motor no sobrepase 1 °C. Luego, después de desenergizar y desconectar el motor, se mide y registra la resistencia del estator así como la temperatura.

4.5.9 Prueba de funcionamiento

Se enciende el motor a su tensión, frecuencia y potencia nominal. El motor debe alcanzar el equilibrio térmico. La estabilidad térmica de un motor se logra cuando la temperatura de los devanados no cambia en más de 1°C en un intervalo de 30 minutos.

La máquina deberá ser cargada con un dinamómetro y debe ser realizada tan rápido como sea posible, para minimizar los cambios de temperatura durante el procedimiento de prueba.

La máquina es acoplada a una máquina de carga y es sometida a cargas en cuatro puntos de carga con aproximadamente el mismo espaciado entre 25% y hasta 100% de la carga y dos puntos de la carga por encima del 100% sin exceder el 150% de la carga.

En cada punto de carga se deben registrar los valores de potencia eléctrica, corriente, voltaje, frecuencia, velocidad o deslizamiento par de torsión, temperatura del devanado del estator, resistencia del devanado del estator y temperatura ambiente.

La prueba debe realizarse desde el valor de carga más alto e ir descendiendo hasta el valor de carga más bajo, los resultados se anotan en la Tabla 9.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

Prueba de funcionamiento						
Porcentaje de carga	25%	50%	75%	100%	125%	150%
Tensión entre terminales V_{1-2} (V)						
Tensión entre terminales V_{1-3} (V)						
Tensión entre terminales V_{2-3} (V)						
Promedio Tensión entre terminales						
Frecuencia f_m (Hz)						
Corriente de línea I_1 (A)						
Corriente de línea I_2 (A)						
Corriente de línea I_3 (A)						
Potencia de entrada P_{em} (kW)						
Par torsional del motor T_m (Nm)						
Velocidad de rotación n_m (rpm)						
Temperatura devanados estator t_{1-2}						
Temperatura devanados estator t_{1-3}						
Temperatura devanados estator t_{2-3}						
Promedio temp devanados estator						
Resistencia del devanado R_{1-2}						
Resistencia del devanado R_{1-3}						
Resistencia del devanado R_{2-3}						
Promedio resistencia devanados						
Temperatura ambiente t_{am} (°C)						

Tabla 9. Prueba de funcionamiento

4.5.10 Mínima carga posible en el dinamómetro

Luego de ajustar el dinamómetro a su carga mínima, se ajusta a la tensión y frecuencia nominal, hasta que la potencia de entrada no varíe más de un 3% en 30 minutos.

Se mide y se registran los siguientes parámetros, tanto los valores puntuales como el promedio

- Tensión eléctrica entre terminales V_{min} (V)
- Frecuencia f_{min} (Hz)
- Potencia de entrada $P_{e_{min}}$ (kW)
- Par torsional del motor T_{min} (Nm)
- Frecuencia de rotación n_{min} min^{-1}
- Temperatura detectada en los devanados del estator t_{min} (°C)
- Temperatura ambiente $t_{a_{min}}$ (°C)

Se verifica la potencia demandada (Pd) al motor bajo prueba, esta debe ser menor al 15% de su potencia nominal. Se calcula de la siguiente forma:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

$$P_d = \frac{T_{min} \times n_{min}}{9549} \quad (4)$$

4.5.11 Prueba de operación en vacío

Esta prueba consiste en aplicar, en forma descendente, valores de tensión eléctrica al 125%, 100%, 75%, 60%, 50%, 40%, 30%, 20% de la tensión nominal, o hasta que la corriente de línea llegue al mínimo valor de operación.

Se desacopla el motor del dinamómetro y se opera en vacío a la tensión y frecuencia nominales, hasta que la potencia de entrada no varíe más de un 3% en 30 minutos.

Se registran las mediciones de los siguientes parámetros, en la Tabla 10, a los diferentes valores de tensión:

- Tensión eléctrica entre terminales V_0 (V)
- Frecuencia f_0 (Hz)
- Corrientes de línea I_0 (A)
- Potencia de entrada en vacío P_0 (kW)
- Frecuencia de rotación n_0 (min^{-1})
- Temperatura detectada en los devanados del estator t_0 ($^{\circ}C$)
- Temperatura ambiente t_a ($^{\circ}C$)

Prueba de operación en vacío								
Porcentaje de tensión eléctrica	125%	100%	75%	60%	50%	40%	30%	20%
Tensión de referencia								
Tensión entre terminales V_{1-2} (V)								
Tensión entre terminales V_{1-3} (V)								
Tensión entre terminales V_{2-3} (V)								
Promedio Tensión entre terminales V_0 (V)								
Frecuencia f_0 (Hz)								
Corriente de línea I_1 (A)								
Corriente de línea I_2 (A)								
Corriente de línea I_3 (A)								
Potencia de entrada en vacío P_0 (kW)								
Frecuencia de rotación n_0 (rpm)								
Temperatura devanados estator t_{1-2} ($^{\circ}C$)								
Temperatura devanados estator t_{1-3} ($^{\circ}C$)								
Temperatura devanados estator t_{2-3} ($^{\circ}C$)								
Promedio de temp devanados estator t_0								
Temperatura ambiente t_{a_0} ($^{\circ}C$)								

Tabla 10. Prueba de vacío

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

4.5.12 Cálculo de las pérdidas mediante el método de segregación de pérdidas

Cálculo de las pérdidas I^2R en el devanado del estator. (P_s)

Las pérdidas en los conductores del estator se pueden calcular si se conoce la resistencia del estator y la corriente que pasa por él. Para encontrar la resistencia lo más sencillo es medir directamente la resistencia entre línea y línea en las terminales del motor. La resistencia que se obtiene es la resistencia de dos de las tres fases del motor, para encontrar las pérdidas totales se debe tomar en cuenta las 3 fases, tal y como se obtiene en la siguiente ecuación:

$$P_s = 0.0015 \times I_m^2 \times R_m \quad (5)$$

Dónde:

I_m : es el promedio de las corrientes que pasa por los conductores (corrientes de línea) medidas durante la prueba de funcionamiento.

R_m : La resistencia de los conductores en la terminal de referencia luego de hacer la corrección por temperatura a 25 °C según la ecuación (6)

La resistencia de un conductor depende de la temperatura del material. La temperatura del material del que está formado el conductor depende de la corriente que fluye por él. La corriente depende de la carga aplicada en el motor. Para hacer una medición de resistencia es necesario esperar que la temperatura del motor sea estable. La estabilidad térmica de un motor se logra cuando la temperatura de los devanados no cambia en más de 1 °C en un intervalo de 30 minutos.

$$R_m = R_i \times \frac{t_m + K}{t_i + K} \quad (6)$$

La resistencia de las pérdidas del rotor y del estator es corregida a una temperatura ambiente de 25 °C. Se utiliza la ecuación (6) utilizando los siguientes valores.

R_m : La resistencia del conductor corregida a 25 °C

t_m : La temperatura del conductor corregida a 25 °C = temperatura de los devanados al hacer la medición de resistencia + 25 °C – temperatura ambiente al hacer la medición de resistencia

R_i : La resistencia de referencia

t_i : La temperatura de los devanados cuando se midió la resistencia R_i

R : Constante (K = 234,5 para el cobre; K =225 para el aluminio).

El cálculo de las pérdidas en el estator debe hacerse para cada uno de los seis valores de carga aplicados en la prueba de funcionamiento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

Medición de las pérdidas I^2R en el rotor (P_r)

Las pérdidas en el rotor dependen de la corriente y la resistencia. Como no es posible medir directamente la corriente ni la resistencia del rotor se procede a hacer una aproximación. Se utiliza la siguiente ecuación

$$P_r = (P_e - P_s - P_h) \times S_{mc} \quad (7)$$

$$S_m = \frac{n_{sinc} + n_m}{n_{sinc}} \quad (8)$$

Donde,

S_m : Es el deslizamiento por unidad de la frecuencia de rotación síncrona n_{sinc}

P_e : Es la potencia de entrada kW a frecuencia nominal

P_s : Son las pérdidas en los conductores del estator

P_h : Son las pérdidas en el núcleo.

n_m : Frecuencia de rotación

S_{mc} : Pérdidas resistivas

Al igual que las pérdidas en los conductores del estator es necesario corregir las pérdidas en el rotor (pérdidas resistivas) a una temperatura de 25 °C. Para esto se utiliza la ecuación (9) con la diferencia de que las pérdidas P_s se toman a 25 °C, y son calculadas previamente para luego corregir el deslizamiento usando la ecuación:

$$S_{mc} = S_m \times \frac{t_c + K}{t_m + K} \quad (9)$$

Donde

S_m : El deslizamiento en por unidad

t_c : La temperatura de los devanados corregida a 25 °C

t_m : La temperatura de los devanados (°C)

K : Constante ($K = 225$ para el aluminio).

Determinación de las pérdidas por fricción y ventilación (P_{fv}) y cálculo de las pérdidas en el núcleo (P_h)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

Las pérdidas en el núcleo y las pérdidas por fricción y ventilación dependen de la frecuencia del rotor y no de la carga. Por esta razón se pueden encontrar estas pérdidas por medio de una prueba de vacío (sin carga).

Se encuentran las pérdidas en el estator (para el motor sin carga) y se le restan a la potencia de entrada para encontrar el conjunto de las pérdidas en el núcleo y las pérdidas por fricción y ventilación.

$$P_{s0} = 0.0015 \times I_0^2 \times R_{E0} \quad (10)$$

Donde.

I_0 : Es el promedio de las corrientes de línea en vacío

R_{E0} : La resistencia en las terminales de referencia corregida a la temperatura en los devanados del estator de acuerdo con:

$$R_{E0} = R_i \times \frac{t_0 + K}{t_i + K} \quad (11)$$

Donde.

t_0 : La temperatura de los devanados en la terminal de referencia, en vacío

R_0 : La resistencia de referencia

t_i : La temperatura de los devanados cuando se midió la resistencia R_i

K : Constante ($K = 234,5$ para el cobre; $K = 225$ para el aluminio).

Para poder separar las pérdidas por fricción y ventilación de las pérdidas en el núcleo se grafica el conjunto de pérdidas en función del voltaje. Como las pérdidas por fricción y ventilación son puramente mecánicas, estas se encuentran en el punto donde el voltaje de entrada sea cero. Debido a que el motor no puede funcionar sin voltaje es necesario hacer una regresión lineal para encontrar las pérdidas en el punto donde el voltaje es cero.

Las pérdidas en el núcleo dependen del voltaje aplicado, así que es necesario encontrarlas solamente para el punto de operación normal del motor. Aplicando la siguiente ecuación.

$$P_h = P_{eo} - P_{s0} - P_{fv} \quad (12)$$

Donde,

P_{eo} : Potencia de entrada, en vacío

P_{s0} : Pérdidas en el estator, en vacío

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

P_{fv} : Pérdidas por fricción y ventilación

Cálculo de la eficiencia

Luego de calculadas todas las pérdidas del motor se calcula la eficiencia, en todos los puntos de carga de la prueba en funcionamiento, utilizando las potencias corregidas a 25°C según la ecuación:

$$\eta_m = \frac{P_e - P_s - P_h - P_r - P_{fv}}{P_e} \quad (13)$$

Con respecto a los niveles de eficiencia mínimos en la

Potencia Nominal (HP)	Motores Cerrados (%)			Motores Abiertos (%)		
	2 polos	4 polos	6 polos	2 polos	4 polos	6 polos
1	77	85,5	82,5	77	85,5	82,5
1,5	84	86,5	87,5	84	86,5	86,5
2	85,5	86,5	88,5	85,5	86,5	87,5
3	86,5	89,5	89,5	85,5	89,5	88,5
5	88,5	89,5	89,5	86,5	89,5	89,5
7,5	89,5	91,7	91	88,5	91	90,2
10	90,2	91,7	91	89,5	91,7	91,7
15	91	92,4	91,7	90,2	93	91,7
20	91	93	91,7	91	93	92,4
25	91,7	93,6	93	91,7	93,6	93
30	91,7	93,6	93	91,7	94,1	93,6
40	92,4	94,1	94,1	92,4	94,1	94
50	93	94,5	94,1	93	94,5	94,1
60	93,6	95	94,5	93,6	95	94,5

Tabla 11 contiene los valores que deben cumplir los motores sometidos bajo la prueba en la cual se basa el procedimiento desarrollado en los capítulos anteriores.

Potencia Nominal (HP)	Motores Cerrados (%)			Motores Abiertos (%)		
	2 polos	4 polos	6 polos	2 polos	4 polos	6 polos
1	77	85,5	82,5	77	85,5	82,5
1,5	84	86,5	87,5	84	86,5	86,5
2	85,5	86,5	88,5	85,5	86,5	87,5
3	86,5	89,5	89,5	85,5	89,5	88,5
5	88,5	89,5	89,5	86,5	89,5	89,5
7,5	89,5	91,7	91	88,5	91	90,2
10	90,2	91,7	91	89,5	91,7	91,7
15	91	92,4	91,7	90,2	93	91,7

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

20	91	93	91,7	91	93	92,4
25	91,7	93,6	93	91,7	93,6	93
30	91,7	93,6	93	91,7	94,1	93,6
40	92,4	94,1	94,1	92,4	94,1	94
50	93	94,5	94,1	93	94,5	94,1
60	93,6	95	94,5	93,6	95	94,5

Tabla 11. Eficiencia mínima IEEE112

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones

- Se realizó un análisis de las principales normas para la evaluación de eficiencia en motores trifásicos de inducción. Luego se seleccionaron las normas IEEE112 y IEC60034-2-1, para realizar un análisis comparativo. A partir de esta comparación se pudo observar que, estas normas son muy similares; sin embargo, también existen diferencias que impactan la evaluación de la eficiencia del motor. Dentro de las diferencias más representativas se encontraron que la norma IEEE112 establece una secuencia o el orden para realizar las pruebas, esto con el fin de controlar la mayoría de variables en la ejecución de la prueba y la norma IEC60034-2-1 no establece un orden para realizar cada prueba, esto podría afectar el resultado de la prueba si se comparan los valores obtenidos de ambas normas.
- Se pudo establecer que las normas técnicas colombianas, asociadas a la evaluación de eficiencia energética en motores, se basan de forma directa de las normas indicadas IEEE112 y IEC60034-2
- Como resultado de la búsqueda de motores más vendidos, partiendo de la información de algunos proveedores locales, se encontró que uno de los motores más utilizado en la industria local es el trifásico, con potencias nominales entre 1 y 10 HP.
- Se definió como metodología a desarrollar, el método B de la norma IEEE112. Esta metodología se conoce como: Entrada – Salida, con segregación de pérdidas y medición indirecta de la pérdida dispersa en la carga.
- La evaluación de las especificaciones de los equipos disponibles en el laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia de Parque I, entregó un resultado positivo, dado que todos los dispositivos de medida, cumplen con los requerimientos de la norma.
- Se desarrolló la guía para la evaluación de la eficiencia de motores de inducción trifásicos hasta de 5 HP (2.23KW), que se incluye como documento anexo. Esta indica entrega al usuario, un paso a paso para la evaluación de la eficiencia energética en motores de inducción trifásicos, con potencias hasta de 5 HP a 1800rpm.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

- Con respecto a los equipos faltantes para desarrollar a cabalidad, se dejan indicadas en el documento las especificaciones mínimas requeridas. Se entregan adicionalmente, referencias de equipos que cumplen con dichos requerimientos.

5.2 Recomendaciones

- Uno de los resultados del proyecto, está asociado a la identificación de necesidades por parte del laboratorio, para lograr el desarrollo de la guía y la evaluación de eficiencia en motores. Por tanto se recomienda al encargado del laboratorio, realizar la compra de dichos equipos, en el caso de querer aprovechar dicho espacio para prestación de servicios.
- Se recomienda evaluar la infraestructura y el personal de apoyo requeridos para el desarrollo de la prueba, antes de su implementación.


5.3 Trabajos futuros

- Se pueden proponer como trabajos futuros, el desarrollo de una guía para evaluación de eficiencia en motores de inducción monofásicos, bajo la norma colombiana NTC 5983.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

6 ANEXOS.

-
- 6.1** Guía para la evaluación de eficiencia energética en motores de inducción Laboratorios de Energía Eléctrica.

	GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia	Código	FGL 029
		Versión	01
		Fecha	

1. IDENTIFICACIÓN DE LA GUÍA

Nombre de la guía:	Evaluación de eficiencia para motores de inducción trifásicos.
Código de la guía (No.):	Guía 1
Taller(es) o Laboratorio(s) aplicable(s):	Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia
Programa(s) Académico(s) / Facultad(es):	Facultad de Ingenierías

2. RECURSOS REQUERIDOS

- Fuente trifásica (EPYCO)
- Multímetro FLUKE 179 o con especificaciones similares
- Amperímetro FLUKE 325 o con especificaciones similares
- Dinamómetro rotativo hasta de 10HP

3. INTRODUCCIÓN


La evaluación de eficiencia en motores eléctricos es muy importante desde el punto de vista de consumo energético de la empresa; por lo tanto, es importante conocer cuál es la eficiencia nominal de los motores eléctricos para luego seleccionar los de mayor eficiencia.

La presente guía tiene como finalidad evaluar las condiciones de eficiencia de los motores de inducción trifásicos. Esta prueba tiene un alcance para motores hasta de 10HP. Esta prueba está basada en la norma internacional IEEE112-B.

Los principales métodos para la determinación de la eficiencia y las pérdidas, según norma IEEE se muestran en la Tabla 12:

Método A	Entrada – salida
Método B	Entrada – salida con segregación de pérdidas y medición indirecta de la pérdida dispersa en la carga
Método B1	Entrada – salida con segregación de pérdidas, medición indirecta de la pérdida dispersa en la carga y una temperatura asumida
Método C	Máquinas duplicadas con segregación de pérdidas y medición indirecta de la pérdida dispersa en la carga

Tabla 12. Métodos para la determinación de la eficiencia

	GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia	Código	FGL 029
		Versión	01
		Fecha	

4. PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

a. Medición de resistencia de referencia

Para esta prueba el motor deberá estar apagado. Se deben medir y registrar los valores de la resistencia de los devanados del motor y la temperatura ambiente. Se deben medir y registrar todas las combinaciones posibles R (1-2), R (2-3) y R (1-3) y se registran en la Tabla 13:

Donde,

R (1-2), R (2-3) y R (1-3) es la resistencia medida entre las terminales (1, 2), (2,3) y (1,3) del motor


T (1-2), T (2-3) y T (1-3) es la temperatura medida entre las terminales (1, 2), (2,3) y (1,3) del motor

Resistencia entre las terminales (Ω)		Temperatura entre las terminales ($^{\circ}\text{C}$)		T ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
R(1-2)		T(1-2)		
R(2-3)		T(2-3)		
R(1-3)		T(1-3)		
Promedio de R_i (Ω)		Promedio de t_i ($^{\circ}\text{C}$)		

Tabla 13. Resultados de medición

Todos los niveles de tensión deberán ser leídos en los terminales del motor. El nivel de tensión de la fuente no deberá variar en más de $\pm 0,5\%$ del valor nominal dado en las placas del motor, con un desbalance máximo de $\pm 0,5\%$. El porcentaje del desbalance es igual a 100 veces la desviación máxima de la tensión eléctrica de cada fase con respecto a la tensión eléctrica promedio, dividida entre la tensión eléctrica promedio.

La distorsión armónica total de la onda de tensión eléctrica no debe ser mayor al 5%.

	GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia	Código	FGL 029
		Versión	01
		Fecha	


b. Prueba de funcionamiento

Esta prueba trabaja a tensión, frecuencia y potencia nominal del motor. El dinamómetro hará las veces de carga del motor, por tanto deberán estar acoplados. Para comenzar, se alimenta el motor con tensión nominal. El motor deberá ser sometido a cargas en cuatro puntos de operación dentro del rango nominal (entre 25% y el 100%), con aproximadamente el mismo espaciado. Adicionalmente se deberán medir dos puntos de operación por encima de la potencia nominal, sin exceder el 150% de la carga.

Para realizar cada medición, el motor debe alcanzar el punto de equilibrio térmico. La estabilidad térmica de un motor se logra cuando la temperatura de los devanados no cambia en más de 1°C en un intervalo de 30 minutos. Para cada valor de carga se deberán registrar los parámetros indicados en la Tabla 14:

Prueba de funcionamiento						
Porcentaje de carga	25%	50%	75%	100%	125%	150%
Tensión entre terminales V_{1-2} (V)						
Tensión entre terminales V_{1-3} (V)						
Tensión entre terminales V_{2-3} (V)						
Promedio Tensión entre terminales						
Frecuencia f_m (Hz)						
Corriente de línea I_1 (A)						
Corriente de línea I_2 (A)						
Corriente de línea I_3 (A)						
Promedio Corriente de línea I_m (A)						
Potencia de entrada P_e (kW)						
Par torsional del motor T_m (Nm)						
Velocidad de rotación n_m (rpm)						
Temperatura devanados estator t_{1-2}						
Temperatura devanados estator t_{1-3}						
Temperatura devanados estator t_{2-3}						
Temperatura prom. dev. estator t_m						
Resistencia del devanado R_{1-2}						
Resistencia del devanado R_{1-3}						
Resistencia del devanado R_{2-3}						
Promedio resistencia devanados						
Temperatura ambiente t_{am} (°C)						

Tabla 14. Prueba de funcionamiento

	GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia	Código	FGL 029
		Versión	01
		Fecha	

La prueba debe realizarse desde el valor de carga más alto e ir descendiendo hasta el valor de carga más bajo.


c. Prueba de operación en vacío

Para desarrollar esta prueba el motor deberá operar sin carga; es decir, que es necesario desacoplar el dinamómetro del motor. Seguidamente, se debe alimentar el motor con una tensión igual al 125% de la tensión nominal. Para la toma de los datos, se debe verificar que la potencia de entrada no varíe más de un 3% en 30 minutos. Luego, para evaluar los siguientes puntos de operación, se deberá modificar en forma descendente el voltaje de alimentación al 100%, 75%, 60%, 50%, 40%, 30% y 20% de la tensión nominal, o hasta que la corriente de línea llegue al mínimo valor de operación.

Para cada punto de operación, se registran en la Tabla 15 las mediciones de los siguientes parámetros obtenidos:

Prueba de operación en vacío								
Porcentaje de tensión eléctrica	125%	100%	75%	60%	50%	40%	30%	20%
Tensión entre terminales V_{1-2} (V)								
Tensión entre terminales V_{1-3} (V)								
Tensión entre terminales V_{2-3} (V)								
Promedio Tensión entre terminales V_0								
Frecuencia n_0 (Hz)								
Corriente de línea I_1 (A)								
Corriente de línea I_2 (A)								
Corriente de línea I_3 (A)								
Promedio Corriente de línea I_0 (A)								
Potencia de entrada en vacío P_0 (kW)								
Velocidad de rotación n_0 (rpm)								
Temperatura devanados estator t_{1-2}								
Temperatura devanados estator t_{1-3}								
Temperatura devanados estator t_{2-3}								
Promedio de temp devanados estator t_0								
Temperatura ambiente ta_0 (°C)								

Tabla 15. Prueba de vacío

 Institución Universitaria Centro de Laboratorios	GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia	Código	FGL 029
		Versión	01
		Fecha	

d. Carga mínima en el dinamómetro

El motor se debe acoplar al dinamómetro. Se ajusta el dinamómetro a su carga mínima. Luego, se debe alimentar el motor a la tensión y frecuencia nominal, hasta que la potencia de entrada no varíe más de un 3% en 30 minutos, los parámetros se registran en la Tabla 16:

Parámetro	Sigla	Unid	Valor medido
Tensión entre terminales	V_{min}	V	
Frecuencia	f_{min}	Hz	
Potencia de entrada	P_{min}	kW	
Par torsión del motor	T_{min}	Nm	
Frecuencia de rotación	n_{min}	Hz	
T. de los devanados	t_{min}	°C	
T. ambiente	ta_{min}	°C	

Tabla 16. Parámetros medidos


Se debe calcular la potencia demandada (P_d) por el dinamómetro, al motor bajo prueba, como se muestra en la siguiente ecuación. Esta potencia, debe ser menor al 15% de la potencia nominal del motor. Los datos se registran en la Tabla 6:

$$P_d = \frac{T_{min} \times n_{min}}{9549} \quad (1)$$

Donde, T_{min} y n_{min} son los valores hallados en la Tabla 16.

$T_{min} =$		$P_d =$	
$n_{min} =$			

Tabla 17. Registro de resultados

	GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia	Código	FGL 029
		Versión	01
		Fecha	

5. Cálculo de pérdidas en el motor

a. Cálculo de las pérdidas I^2R en el devanado del estator (P_s)

Se debe medir directamente la resistencia entre línea y línea en las terminales del motor, para encontrar las pérdidas totales se deben tomar en cuenta las 3 fases, tal y como se obtiene en la ecuación (2) y se registran en la Tabla 18:

$$P_s = 0.0015 \times I_m^2 \times R_m \quad (2)$$

$I_m =$		$P_s =$	
$R_m =$			

Tabla 18. Registro de resultados

Siendo:

I_m : Es el promedio de las corrientes que pasa por los conductores (corrientes de línea) medidas durante la prueba de funcionamiento (Tabla 14).

R_m : La resistencia de los conductores en la terminal de referencia luego de hacer la corrección por temperatura a 25 °C, según la ecuación y se registran en la Tabla 19:

$$R_m = R_i \times \frac{t_m + K}{t_i + K} \quad (3)$$

$R_i =$		$R_m =$	
$t_m =$			
$t_i =$			


Tabla 19. Registro de resultados

Con:

t_m : Temperatura de los devanados al hacer la medición de resistencia (Tabla 14).

R_i : La resistencia de referencia (Tabla 13).

t_i : La temperatura de los devanados cuando se midió la resistencia R_i (Tabla 13). ($K = 234,5$ para el cobre; $K = 225$ para el aluminio).

 Institución Universitaria Centro de Laboratorios	GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia	Código	FGL 029
		Versión	01
		Fecha	

El cálculo de las pérdidas en el estator siguiendo este procedimiento debe hacerse para cada uno de los seis valores de carga aplicados en la prueba de funcionamiento.

b. Cálculo de pérdidas I^2R en el rotor (P_r)

Las pérdidas en el rotor dependen de la corriente y la resistencia en el rotor. Debido a que no es posible medir directamente la corriente ni la resistencia en el rotor, se realiza una aproximación con la ecuación (4) y se registran en la Tabla 20:

$$P_r = (P_e - P_s - P_h) \times s_{mc} \quad (4)$$

$P_e =$		$P_h =$		$P_r =$	
$P_s =$		$s_{mc} =$			

Tabla 20. Registro de resultados

Dónde:

P_e : Es la potencia de entrada en kW a tensión nominal (Tabla 14).

P_s : Son las pérdidas en los conductores del estator (Tabla 18).

P_h : Son las pérdidas en el núcleo (Tabla 25).


s_m : Es el deslizamiento por unidad de la frecuencia de rotación síncrona n_{sinc}

El deslizamiento se calcula como se muestra en la ecuación (13).

$$s_m = \frac{n_{sinc} + n_m}{n_{sinc}} \quad (5)$$

$n_{sinc} =$		$s_m =$	
$n_m =$			

Tabla 21. Registro de resultados

	GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia	Código	FGL 029
		Versión	01
		Fecha	

Dónde:

n_{sinc} : Frecuencia de rotación asíncrona es hallada por medio de la ecuación (13)

n_m : Frecuencia de rotación (Tabla 14).

$$n_{sinc} = \frac{60f}{p} \quad (6)$$

Se debe realizar la corrección de pérdidas en el rotor a una temperatura de 25°C, como se muestra en la ecuación (7) :

$$S_{mc} = S_m \times \frac{t_c + K}{t_m + K} \quad (7)$$

$S_m =$		$S_{mc} =$	
$t_c =$			
$t_m =$			

Tabla 22. Registro de resultados

Donde


S_{mc} : Pérdidas resistivas

t_c : La temperatura de los devanados corregida (12)

t_m : La temperatura de los devanados (°C)

K : Constante ($K = 225$ para el aluminio).

Para el cálculo de las pérdidas se emplea la potencia a tensión nominal de la prueba en vacío y la potencia a carga nominal para la prueba de funcionamiento.

	GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia	Código	FGL 029
		Versión	01
		Fecha	

c. Determinación de las pérdidas por fricción y ventilación (P_{fv}) y cálculo de las pérdidas en el núcleo (P_h)

Las pérdidas en el núcleo y las pérdidas por fricción y ventilación dependen de la frecuencia del rotor. Estas pérdidas se obtienen a partir de la prueba de vacío, utilizando la ecuación (8) y se registran en la Tabla 23:

$$P_{s0} = 0.0015 \times I_0^2 \times R_{E0} \quad (8)$$

$I_0 =$		$P_{s0} =$	
$R_0 =$			

Tabla 23. Registro de resultados

Donde,

I_0 : Es el promedio de las corrientes de línea en vacío (Tabla 15).

R_{E0} : La resistencia en las terminales de referencia corregida a la temperatura en los devanados del estator de acuerdo con la ecuación (9) y se registran en la Tabla 24:

$$R_{E0} = R_i \times \frac{t_0 + K}{t_i + K} \quad (9)$$

$R_i =$		$R_{E0} =$	
$t_0 =$			
$t_i =$			

Tabla 24. Registro de resultados


Donde,

t_0 : La temperatura de los devanados en la terminal de referencia en vacío (Tabla 15).

R_0 : La resistencia de referencia (Tabla 15).

t_i : La temperatura de los devanados cuando se midió la resistencia R_i (Tabla 13)

K : Constante ($K = 234.5$ para el 100% de conductividad en el cobre IACS, o $K = 225$ para el aluminio, para una conductividad del 62%).

	GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia	Código	FGL 029
		Versión	01
		Fecha	

P_{fv} : Pérdidas por fricción y ventilación

Para poder separar las pérdidas por fricción y ventilación de las pérdidas en el núcleo se grafica el conjunto de pérdidas en función del voltaje. Como las pérdidas por fricción y ventilación son puramente mecánicas, estas se encuentran en el punto donde el voltaje de entrada sea cero. Debido a que el motor no puede funcionar sin voltaje es necesario hacer una regresión lineal para encontrar las pérdidas en el punto donde el voltaje es cero. Se extrapola la curva a la tensión eléctrica en vacío igual a cero. El valor de la potencia de entrada en este punto corresponde a las pérdidas por fricción y ventilación P_{fv} .

Las pérdidas en el núcleo dependen del voltaje aplicado, así que se encuentran en el punto de operación normal del motor con la ecuación (10) y se registran en la Tabla 25:

$$P_h = P_{eo} - P_{s0} - P_{fv} \tag{10}$$

$P_{E0} =$		$P_h =$	
$P_{S0} =$			
$P_{fv} =$			


Tabla 25. Registro de resultados

Donde,

P_{eo} : Potencia de entrada, en vacío (Tabla 15)

P_{s0} : Pérdidas en el estator, en vacío (Tabla 23)

P_{fv} : Pérdidas por fricción y ventilación

	GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia	Código	FGL 029
		Versión	01
		Fecha	

d. Cálculo del factor de corrección del dinamómetro (FCD)

- Se calcula el deslizamiento por unidad de la frecuencia de rotación con respecto a la frecuencia de rotación síncrona, con el dinamómetro a su carga mínima ver ecuación (5).
- Se calculan las pérdidas por efecto Joule en el estator con el dinamómetro a su carga mínima, con las ecuaciones (2) y (3).
- El factor de corrección del dinamómetro, se calcula con la siguiente ecuación, utilizando las mediciones realizadas anteriormente.

$$FCD = \frac{9549}{n_m} [(P_m - P_h) \times (1 - S_m)] - \frac{9549}{n_0} \times (P_{e0} - P_{s0} - P_h) - T_m \quad (11)$$

Valores ya calculados en los numerales anteriores.

Dónde,

P_m : Es la potencia de entrada con el dinamómetro a su carga mínima, medida en la Tabla 16.

P_h : Son las pérdidas en el núcleo (Tabla 25)

T_m : Es el par torsional del motor con el dinamómetro a su carga mínima, medida en la Tabla 16.

n_0 : Es la frecuencia de rotación en vacío (Tabla 15)


e. Potencia de salida corregida

Se calcula el valor del par torsional corregido, utilizando el par torsional medido (Tabla 16), mediante la ecuación (12):

$$T_c = FCD + T_m \quad (12)$$

La potencia de salida corregida se calcula con la ecuación (13):

$$P_{sc} = \frac{T_c \times n_m}{9549} \quad (13)$$

	GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN Laboratorio de Energía Eléctrica y Potencia	Código	FGL 029
		Versión	01
		Fecha	

f. Calculo de eficiencia

Luego de calculadas todas las pérdidas del motor se calcula la eficiencia, en todos los puntos de carga de la prueba en funcionamiento, utilizando las potencias corregidas a 25°C según la ecuación:

$$\eta_m = \frac{P_e - P_s - P_h - P_r - P_{fv}}{P_e} \quad (14)$$

Elaborado por: Juan Carlos Correa

Versión:

Fecha:

Aprobado por: Bonie Restrepo Cuestas

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

7 REFERENCIAS

- Álvarez Fernández, N. (2007). *Análisis de diferentes procedimientos y ensayos para la determinación del rendimiento en motores de inducción trifásicos*. Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú. Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/4615>
- Cortés, A. C. (2008). *Determinación de pérdidas eléctricas en motores de inducción modelados electromagnéticamente con el método de los elementos finitos*. Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v28n3/v28n3a09>
- Galindo Ramírez, B. J. (2010). *Análisis Comparativo de las Normas IEC 60034-2-1 Y IEEE112 para Determinar la Eficiencia de Motores de Inducción en Laboratorio*. Universidad Autónoma de Occidente. Retrieved from <http://bdigital.uao.edu.co/bitstream/10614/1369/1/TEL00503.pdf>
- Guardiola de Cabo, L. A. (2008). *Análisis de la norma IEC 60034-2-1. Aplicación en la determinación de las pérdidas y el rendimiento de motores de inducción trifásicos*. Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2099.1/5455>
- ICONTEC. (2002). *Eficiencia energética en motores eléctricos. Método de ensayo para medir la eficiencia. Tecnología americana (NTC 5111)*. Bogotá (Colombia). Retrieved from <http://tienda.icontec.org/brief/NTC5111.pdf>
- ICONTEC. (2008). *Máquinas eléctricas rotatorias. métodos para la determinación de las pérdidas y de la eficiencia a partir de ensayos (NTC 3477)*. Bogotá. Retrieved from <http://tienda.icontec.org/brief/NTC3477.pdf>
- (Bojaca, 2010)Álvarez Fernández, N. (2007). *Análisis de diferentes procedimientos y ensayos para la determinación del rendimiento en motores de inducción trifásicos*. Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú. Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/4615>
- Bojaca, F. (2010). *EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS ADICIONALES EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN*. *Journal of Chemical Information and Modeling*.
- Cao, W. (2009). Comparison of IEEE 112 and new IEC standard 60034-2-1. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(3), 802–808. <http://doi.org/10.1109/TEC.2009.2025321>
- Chapman, S. J. (2000). *Maquinas electricas 3era edicion* (3era edici).
- Fluke. (2001). Serie 170 de multímetros digitales Fluke. Retrieved from <http://www.fluke.com/fluke/tten/digital-multimeters/fluke-170.htm?pid=56027>
- Fluke. (2012). Pinza amperimétrica de verdadero valor eficaz Fluke 325. Retrieved from <http://www.fluke.com/fluke/coes/Pinzas-Amperimetricas/Fluke-325-True-rms-Clamp-Meter.htm?PID=74609>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

- Guardiola de Cabo, L. A. (2008). *Análisis de la norma IEC 60034-2-1. Aplicación en la determinación de las pérdidas y el rendimiento de motores de inducción trifásicos*. Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2099.1/5455>
- ICONTEC. (2002). *Eficiencia energética en motores eléctricos. Método de ensayo para medir la eficiencia. Tecnología americana (NTC 5111)*. Bogotá (Colombia). Retrieved from <http://tienda.icontec.org/brief/NTC5111.pdf>
- ICONTEC. (2008). *Máquinas eléctricas rotatorias. métodos para la determinación de las pérdidas y de la eficiencia a partir de ensayos (NTC 3477)*. Bogotá. Retrieved from <http://tienda.icontec.org/brief/NTC3477.pdf>
- ICONTEC. *Eficiencia energética de motores eléctricos de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, enfriados con aire, en potencia nominal de 0,180 kw a 1,500 kw. límites. Método de prueba y rotulado (NTC 5983) (2013)*. Bogotá (Colombia), Bogotá. Retrieved from <http://tienda.icontec.org/brief/NTC5983.pdf>
- Rockwell, A. (1997). *Conceptos básicos sobre el uso de los motores de inducción trifásicos. WP-Motors-ES*.
- Vilaragut, M., Costa, Á., & Garcia, A. (2004). Métodos para la determinación de la eficiencia energética en los motores de inducción trifásicos. *Revista Científica de Las Energías Renovables*, 04, 19.
- ICONTEC. (2013). *Eficiencia energética de motores eléctricos de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, enfriados con aire, en potencia nominal de 0,180 kw a 1,500 kw. límites. Método de prueba y rotulado (NTC 5983)*. Bogotá (Colombia). Retrieved from <http://tienda.icontec.org/brief/NTC5983.pdf>
- Maruszczky, J. Lhenry, M . Helinko, M . Korendo,Z *Definición de normas mundiales de eficiencia energética*. Retrieved from https://library.e.abb.com/public/bf74f0fa3fee0e07c125762c002f2548/50-55%203M989_SPA72dpi.pdf

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-04-14

FIRMA ESTUDIANTE Juan Carlos Correa

FIRMA ASESOR Donle J. Restrepo C

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 ENTREGA: _____