

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO
ESTACIÓN DE PRUEBAS PARA MÁQUINAS ELÉCTRICAS**

Trabajo presentado como requisito parcial para optar por el título de
Magister Scientiarum en Controles Industriales de la Universidad de Pamplona

Autor:
ING. OSCAR ORLANDO GUERRERO DÍAZ

Director científico:
M. Sc. JORGE LUIS DÍAZ RODRÍGUEZ.

Asesor científico:
Ph. D. ALDO PARDO GARCÍA

Pamplona, Colombia 2018

Agradecimientos

A Dios por su misericordia al permitirme culminar la Maestría y la Iglesia el Poder de la Fe por darme la gracia, fortaleza y sabiduría en este proceso.

A Mis Padres NESTOR MANUEL GUERRERO CEBALLOS q.e.p.d. y ROSALBA DÍAZ DE GUERRERO, por apoyarme en mis inicios de la educación y la culminación de la profesión de Ingeniero Electricista, sin la cual no estaría logrando este objetivo.

A Mi Señora e Hijos TERESA DUPLAT JÁCOME, OSCAR MANUEL GUERRERO DUPLAT Y CLAUDIA PATRICIA GUERRERO DUPLAT, quien son el motivo de mis esfuerzos y por su tolerancia en las dificultades.

Al Ingeniero M.Sc. Jorge Luis Díaz Rodríguez por ser la persona que me ideó y Dirigió esta maestría, y por sus grandes conocimientos en modelos matemáticos.

Al Ingeniero Ph.D. Antonio Gan Acosta quien me revisó y aconsejó para la mejora de esta Maestría.

Al Ingeniero M.Sc. Ciro Antonio Carvajal Labastida quién como Coordinador de la Universidad Antonio Nariño y mi jefe directo en la práctica de laboratorio, por sus enseñanzas, por guía en cada paso de este proceso y por compartir su conocimiento, sabiduría y ayuda económica.

Al Ingeniero Ph.D. Julio Martín Duarte Carvajalino por su excelente contribución con los modelos en Matlab y el artículo para la revista UIS.

Al Ingeniero Ph.D. Aldo Pardo García por su Liderazgo, visión de futuro y asesorías en la profundización de este proyecto.

Al Ingeniero Esp. Edgar Santos Hidalgo por tantas enseñanzas, dentro de la Presidencia de ACIEM y como compañero docente en la Universidad Antonio Nariño.

A la Universidad Antonio Nariño por permitirme formar parte de su cuerpo docente y prestar sus laboratorios para la investigación y prácticas demostrativas de la estación de pruebas.

A mis compañeros docentes de la Universidad de Pamplona, Universidad Antonio Nariño y el SENA, en especial a mi compañero el Ingeniero Mecánico Benjamín Otero por compartir sus conocimientos y experiencias vividas.

A mis Amigos quienes me motivaron y apoyaron en este proceso lleno de obstáculos.

A todos Gracias!

Resumen

La investigación se fundamenta en el diseño y construcción de una estación de prueba, monitoreo y diagnóstico de máquinas eléctricas, utilizando un tablero didáctico que contiene motores, bobinas, condensadores, resistencias, par electromagnético, sistema de sensores de las variables eléctricas, magnéticas, mecánicas y térmicas de las Máquinas, un Sistema de Adquisición y Procesamiento de Datos basado en una PC compatible, complementándolo con un sistema de arranque de motores, directo, estrella triángulo, y arrancador suave, así como, medidores de energía de red, analizadores de red, y medidores de parámetros existentes en el mercado con el fin de ofrecer confiabilidad a la medida registrada en los computadores en los cuales se grabará el software para realizar esta captura.

Se implementa con la ayuda de los avances tecnológicos la arquitectura y el software, existente y creado con comunicación por computador y las posibilidades de medición de diferentes variables tales como, eléctricas: tensión y corriente; magnéticas: flujos mecánicas: par y velocidad y térmicas: temperatura; pruebas más comunes que se le realizan a las máquinas eléctricas.

Los resultados de las mediciones se usaron para obtener los parámetros de las máquinas, resistencias e inductancias, importantes para establecer su modelo utilizado en sistemas de control y diagnóstico de máquinas eléctricas. Como resultado complementario se registra que las mediciones realizadas en los motores reales se compararon con los resultados de las simulaciones de la máquina en las mismas condiciones en el software profesional MATLAB Y SIMULINK y se emiten comentarios, que mejoraran el proceso de modelado de la máquina.

Palabras claves: Rendimiento, Productividad, Calidad, Investigación, Máquinas Eléctricas, Parámetros, Reglamentos.

Abstract

The research is based on the design and construction of a test station, monitoring and diagnostics of electrical machines, using a didactic board containing motors, coils, capacitors, resistors, electromagnetic torque sensor system electrical variables, magnetic, mechanical and thermal Machines, system Acquisition and data Processing based on a compatible PC, supplemented by a system of motor starting, direct, star delta and soft starter, as well as power meters network, network analyzers and gauges existing market parameters in order to provide reliability to the measurement recorded on computers on which the software is recorded for this capture.

It was implemented with the help of technological advances architecture and software, existing and created with computer communications and the possibilities of measuring different variables such as power: voltage and current, magnetic: flows, mechanical: torque and speed and thermal temperature; most common tests that are performed to electrical machines.

The results of the measurements were used to obtain the parameters of the machines, resistors and inductors, important to establish the model used in control systems and diagnostics of electrical machines. As a complementary result is recorded that measurements made on real engines were compared with the results of simulations of the machine under the same conditions in MATLAB and SIMULINK professional software and comments that improve the modeling process of the machine are issued.

Keywords: Efficiency, Productivity, Quality, Research, Electrical Machines, Parameters, Regulations.

Contenido

	pág.
Introducción	13
1.El Problema	13
1.1 Título del Proyecto	15
1.2 Planteamiento del Problema	15
1.3 Formulación del Problema	17
1.4 Naturaleza y Planteamiento del Problema	18
1.5 Formulación de la Hipótesis	19
2. Justificación	20
2.1 Importancia de la investigación desde el punto de vista teórico	20
3. Objetivos	23
3.1 Objetivo General	23
3.2 Objetivos Específicos	23
3.3 Delimitación del Proyecto	23
3.4 Acotaciones	26
4. Principios Generales	27
4.1 Antecedentes	27
4.2 Estado del Arte	28
4.3 Marco Teórico	29
4.3.1 Generalidades	29
4.3.2 Modelo matemático del motor de inducción	33
4.3.3 Estimación de los parámetros de motores de inducción a partir de las medidas de pérdidas de potencia	48

4.3.4 Gestión de auditoria energética	62
4.3.4.1 Tipos de auditorías energéticas	62
4.3.5 Avances del reglamento técnico de etiquetado RETIQ	70
5. Metodología de Actividades	91
6. Resultados	92
6.1 Diseño y Desarrollo de la Estación Experimental	92
6.2 Parámetros de las Máquinas Eléctricas	97
6.3 Entrega de Motor para Pruebas	109
7. Presupuesto Económico	111
8. Fuentes de Financiación	112
9. Conclusiones	113
10. Recomendaciones	114
Referencias Bibliográficas	115
Glosario	124
Anexos	134

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Presentación Director PNUD Etiqueta energética	21
Figura 2. Tablero para conexionado del sistema de control y fuerza de motores trifásicos de corriente alterna según diseño realizado	24
Figura 3. Osciloscopios para observación y medida de los parámetros de tensión y frecuencia de los motores conectados	24
Figura 4. Variador de velocidad, motor y elementos para sistemas de control	25
Figura 5. Medidor de energía trifásico el cual incluye diferentes medidas como tensión, corriente en cada una de las fases, potencia, factor de potencia, energía consumida activa y reactiva	25
Figura 6. Autómatas programables para prácticas de control en motores	26
Figura 7. Evolución del concepto de la eficiencia energética	30
Figura 8. Circuito equivalente del bobinado de estator de una MI	35
Figura 9. Circuito equivalente del bobinado de rotor equivalente	35
Figura 10. Diagrama de flujo de potencia para un motor A.C. 3	36
Figura 11. Despiece de un motor eléctrico trifásico de inducción tipo jaula de ardilla	40
Figura 12. Motor tipo Jaula de Ardilla. (a) Barras embebidas en el fiero y anillos, (b) Rotor sólido	41
Figura 13. FMM y corrientes en el rotor jaula de ardilla	43
Figura 14. Bobinado típico de un motor de inducción trifásico de C.A	43
Figura 15. La medida de caballos de poder	45
Figura 16. Pérdidas en vacío para 7 valores distintos de tensión	51
Figura 17. Pérdidas en el hierro para 7 valores distintos de tensión	51
Figura 18. Pérdidas residuales para 6 valores distintos del par	52

Figura 19. Distribución de las pérdidas del motor a la tensión nominal	53
Figura 20. Parámetros de un motor de inducción referidos al estator	55
Figura 21. Simulación en Matlab del circuito equivalente	60
Figura 22. Transitorio de la corriente del estator	60
Figura 23. Simulación en Matlab del motor de inducción	61
Figura 24. Transitorio de la corriente en el rotor	61
Figura 25. Clasificación de los proyectos de eficiencia energética para la industria	66
Figura 26. Definición del esquema energético para la industria	70
Figura 27. Muestra de la etiqueta que debe llevar	72
Figura 28. Especificaciones para la ilustración de rangos de eficiencia con barras de colores en tamaño de etiqueta A6	75
Figura 29. Ejemplo de dimensiones, distribución y tipos de letra a usar de una etiqueta tamaño A6	78
Figura 30. Ejemplo de etiqueta para motores trifásicos	79
Figura 31. Estación de pruebas para máquinas eléctricas	92
Figura 32. Sistema de adquisición de datos	93
Figura 33. Proceso de adquisición de datos	94
Figura 34. Imágenes del osciloscopio virtual y el par motor	95
Figura 35. Imágenes de los parámetros eléctricos del motor analizado	95
Figura 36. Imágenes del medidor de energía del O.R. Muestra los Kva del motor analizado	96
Figura 37. Imágenes de los Kvar del motor analizado	96
Figura 38. Resultados factor de potencia sin capacitores	100
Figura 39. Resultados factor de potencia con capacitores fijos de 4 μ F	100
Figura 40. Resultado factor de potencia activa sin capacitares	101
Figura 41. Resultado factor de potencia activa con capacitores fijos de 4 μ F	101

Figura 42. Resultado potencia reactiva sin capacitores	102
Figura 43. Resultado potencia reactiva con capacitores	103
Figura 44. Resumen de potencias	103
Figura 45. Triángulo de potencias e impedancias	104
Figura 46. Etiqueta asignada para el motor de prueba Labvolt	109
Figura 47. Motor acoplado a un generador de CC para pruebas de laboratorio	110

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1. Parámetros estimados del motor de inducción (Ω)	59
Tabla 2. Colores normalizados para identificación de rangos de etiquetado	76
Tabla 3. Rangos de etiquetado	77
Tabla 4. Límite inferior nominal para Eficiencia Super Premium (IE4) (%) 60Hz	81
Tabla 5. Límite inferior nominal para Eficiencia Premium (IE3) (%) 60Hz	82
Tabla 6. Límite inferior nominal para Eficiencia Alta (IE2) (%) 60Hz	83
Tabla 7. Límite inferior nominal para Eficiencia Estándar (IE1) (%) 60Hz	84
Tabla 8. Rangos de eficiencia energética para motores trifásicos	85
Tabla 9. Tolerancias en los valores de las cantidades	87
Tabla 10. Valores tomados sin corregir el factor de potencia	97
Tabla 11. Valores tomados con el factor de potencia corregido por un banco de capacitores de 4 μ F	98
Tabla 12. Resumen medidas de potencia	106
Tabla 13. Límite inferior nominal para eficiencia super premium (IE4) (%) 60Hz	106
Tabla 14. Rangos de eficiencia energética para motores trifásicos	108
Tabla 15. Rangos de eficiencia energética para motores trifásicos	108
Tabla 16. Presupuesto	111

Lista de Anexos

	pág.
Anexo 1. Actividades en el laboratorio	135

Introducción

Las Máquinas Eléctricas son cada día más utilizadas en el mundo por ser menos contaminantes, más herméticas y evitan el gasto desmedido de los recursos naturales, entre otros muchos factores.

Con base en la premisa anterior, la investigación propone como trabajo de grado, construir una estación de pruebas, monitoreo y diagnóstico de máquinas eléctricas, utilizando diferentes tableros de control que contienen equipos, sistemas para arranque y prueba de motores, así como diferentes tipos de sensores para capturar variables eléctricas, magnéticas, mecánicas, térmicas y un sistema de adquisición y procesamiento de datos para registrar en computador, con el fin de comparar el consumo de energía de estos motores frente a su entrega de potencia mecánica.

Con el desarrollo de esta investigación se quiere aportar los procedimientos científicos y tecnológicos en la verificación y validación de los parámetros eléctricos trasladados por medio de interfaces de adquisición de datos y de control a computadores que nos permitan mostrar y registrar estos parámetros; analizarlos y compararlos con los medidores de energía de los operadores de red, así como los analizadores de red existentes en la universidad y los equipos de medida que se encuentran en el mercado.

De igual manera, comparar las mediciones realizadas con lo exigido por reglamentos, normas, modelos y estándares nacionales e internacionales acordes con la investigación tales como: ISO 50.001, relacionada con la gestión energética, URE (uso racional de energía), RETIE, RETILAP y el RETIQ (Reglamento técnico de etiquetado) este último próximo a salir en Colombia, el cual, se refiere a verificar y determinar a qué equipo se les debe analizar su

consumo con respecto a su aporte mecánico, de tal manera que nos permita concluir su eficiencia energética y seleccionar la letra a colocar en la etiqueta de estas máquinas eléctricas.

Por lo anterior inicialmente se planteaba el siguiente interrogante ¿Será posible obtener los parámetros de las máquinas eléctricas con un alto grado de precisión, para establecer modelos igual de precisos a la máquina eléctrica real?, ¿Cuántos proyectos de pregrado, recursos propios y de la Universidad nos llevarían a obtener esta estación de pruebas para poder realizar la investigación, de cuál (por ejemplo), es el motor que consume menos energía respecto a la entrega de par mecánico y de esta forma verificar si la letra que indica que tan eficiente es (que el fabricante colocó), cumple con la exigida por el reglamento RETIQ?

Con base a la anterior premisa, el presente trabajo da a conocer una investigación fundamentada en la necesidad de crear, realizar y encontrar equipos que permitan construir una estación de pruebas que capture y registre los parámetros que nos permitan analizar, comparar y determinar la máquina eléctrica con menor consumo de energía, con respecto a la entrega de par mecánico.

Hecho lo anterior, dar el resultado del equipo que presenta mejor operación, reducción máxima de las pérdidas, y un uso racional y eficiente de la Energía eléctrica.

1. El Problema

1.1 Título del Proyecto

ESTACIÓN DE PRUEBAS PARA MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

1.2 Planteamiento del Problema

Medir el rendimiento de las máquinas que usan la energía eléctrica, construir o implementar una interface para capturar estas medidas, crear o adaptar un software que permita mostrar en uno a varios computadores todos los parámetros eléctricos requeridos con el fin de, estudiar, analizar y entregar resultados que permitan tomar acciones sobre cuál equipo por ejemplo, se encuentra dentro de los parámetros permitidos por el RETIQ, reglamento técnico de etiquetado que inició su aplicación a mediados del mes de agosto de 2016 en Colombia y así reducir el consumo de energía eléctrica sin causar un impacto negativo en el confort, productividad y calidad de la producción, es importante si queremos hacer un uso racional de energía y entregar un buen índice de gestión energética en las fábricas.

Fundamentar el proyecto sobre la teoría de capturar todos los datos requeridos, diseñando, construyendo e implementando una estación de pruebas para máquinas eléctricas, con monitoreo y diagnóstico de parámetros eléctricos, utilizando un tablero didáctico que contenga motores, bobinas, condensadores, resistencias, par electromagnético, generadores D.C. y A.C., sistemas de sensores de las variables eléctricas, magnéticas, mecánicas y térmicas, un Sistema de Adquisición y Procesamiento de Datos basado en una interface con un PC y software compatible, complementándolo con un sistema de arranque de motores, directo, estrella triangulo, y variador de velocidad, así como, medidores de energía de red, analizadores de red, y medidores de

parámetros eléctricos , mecánicos y térmicos existentes en el mercado con el fin de ofrecer confiabilidad a la medida registrada en los computadores, medidas que se deben grabar con el software implementado para realizar esta captura.

Lograr comprobar con la investigación la Teoría de capturar los parámetros eléctricos mecánicos y magnéticos a través de la construcción de una interface y creación de un software compatible para computador, determinando que es una realidad a través de estos años de trabajo unido a proyectos de pregrado y con la ayuda de los avances tecnológicos entre otros los sensores de efecto hall, los octoacopladores, los sensores de par, los encoder y un mayor conocimiento del electromagnetismo, todos concentrados en la electrónica de potencia y la creación de software compatibles con PC., para capturar estas medidas.

La tesis de esta maestría se concentra ahora en la implementación de la arquitectura y el software existente, creada con interface para comunicación por computador para capturar la medida de diferentes variables tales como; Eléctricas: Tensión y Corriente; Magnéticas: Flujos; Mecánicas: Par y velocidad y Térmicas: temperatura; pruebas estas que son las más comunes que se le realizan a las máquinas eléctricas, siendo una de estas la realizada a los motores eléctricos trifásicos de corriente alterna para que el usuario conozca con que letra en la escala de valores de eficiencia energética fue construido según el reglamento técnico de etiquetado. Estas pruebas se realizan sin carga (rotor libre), sin capacitores y con capacitores (factor de potencia corregido y sin corregir), y con carga (colocando un generador de corriente continua o freno electromagnético !dinamómetro!) para completar una estación de pruebas. Podemos concluir que se trabajó en diversas condiciones funcionales de freno o carga del generador, a frecuencia constante en estado de estable, y frecuencia variable como pruebas clásicas de trabajo de las máquinas eléctricas en la industria.

Los resultados de las mediciones registrados en los computadores se usan para obtener la eficiencia de los motores analizados comparados con la norma del RETIQ y los diferentes parámetros eléctricos de la máquina, como son: Tensión, Intensidad de corriente, Potencia (Activa, Reactiva, Aparente) comparados con los medidores de energía instalados por el operador de red, con factor de potencia corregido y sin corregir, con diferentes par mecánico o carga del generador de corriente continua. Así mismo calcular la resistencia e inductancia, importantes para establecer su modelo matemático utilizado en la fabricación de sistemas de control y diagnóstico de máquinas eléctricas.

Como resultado complementario se registran parámetros importantes como son la velocidad y su correspondencia con la frecuencia, la tensión y corriente con el osciloscopio en forma real y virtual importantes para analizar su forma de onda recibida y entregada por las máquinas eléctricas, de tal manera que las mediciones realizadas con equipos externos se puedan comparar con los resultados de las simulaciones en las mismas condiciones con el software profesional y modelos creados en Matlab para emitir comentarios, que mejorarán el proceso de fabricación de la máquina.

1.3 Formulación del Problema

En general la situación energética y ambiental que presenta actualmente la humanidad hace necesario la creación de estrategias que aseguren tanto el uso racional de los recursos energéticos del planeta como el desarrollo de las futuras generaciones.

De forma específica, el problema que una empresa presenta es que no tiene estudios sobre el uso de la energía eléctrica, que le permita: conocer cuál es el costo que le incurre para cada proceso, no tiene identificadas las zonas de mayor consumo para centrar sus esfuerzos en dichas

zonas, determinar el estado actual de sus equipos y sistemas, realizar acciones encaminadas a la mejora continua de sus equipos y sistemas, establecer protocolos y conductas en el uso de la energía por parte de los operadores de los procesos, entre otras.

1.4 Naturaleza y Planteamiento del Problema

La implementación en tiempo real de esta estación de pruebas permitirá que los estudiantes de pregrado y posgrado puedan verificar conceptos abstractos como las teorías de los tensores, fasores y vectores espaciales, obtener los parámetros de las máquinas eléctricas, verificar las simulaciones, obtener las características mecánicas y el comportamiento transitorio del motor, de forma tal que este proyecto sirva de herramienta para la mejor comprensión del funcionamiento de las Máquinas Eléctricas y sus dispositivos de automatización y control.

Por tanto, uno de los objetivos del trabajo es servir como herramienta en el área de las máquinas y los accionamientos eléctricos para docencia (pregrado y posgrado) e investigación, permitiendo comparar los parámetros, modelos, balance energético y funcionamiento en estado transitorio de los motores eléctricos de baja potencia. Para que en una etapa siguiente estudiar e investigar las estrategias de control y observación de novedosas temáticas de accionamiento eléctrico.

Por lo anterior se puede plantear el siguiente interrogante ¿Será posible obtener los parámetros de las máquinas eléctricas con un alto grado de precisión, para establecer modelos igual de precisos a la máquina eléctrica real?

1.5 Formulación de la Hipótesis

Si se conocen los parámetros de las máquinas eléctricas con alto grado de precisión, es posible verificar los modelos y establecerlos lo más parecido a la realidad, cuestión importante para el diseño y análisis de sistemas de control que utilicen máquinas eléctricas, y establecer sus procesos transitorios, realizar de forma precisa el balance energético, la eficiencia de la máquina, e inclusive para obtener sistemas de diagnóstico y detección de fallas de las mismas.

2. Justificación

La globalización exige que las empresas cada día sean más competitivas, que sus productos tengan una mayor calidad, sus procesos sean más amigables con el ambiente y que éstos cumplan con los estándares nacionales e internacionales para poder mantenerse dentro del mercado. Esta situación ha originado que se tomen medidas al respecto, una de ellas es hacer un uso eficiente y racional de la energía eléctrica ya que esta representa un porcentaje alto en los costos de producción.

A partir de la anterior apreciación se hace necesario realizar un estudio, análisis y medición del rendimiento en el uso de la energía eléctrica con el fin de implementar acciones que permitan reducir el consumo de energía eléctrica sin causar un impacto negativo en el confort, productividad y la calidad de la producción. Por otro lado se garantiza un posible ahorro significativo en los costos de producción y una disminución considerable en los niveles de contaminación ambiental.

2.1 Importancia de la investigación desde el punto de vista teórico

Este trabajo puede resultar como un aporte a la verificación y validación de los modelos de las Máquinas Eléctricas. A pesar de la amplia literatura existente en el área del modelado, la obtención de los parámetros y el diagnóstico de las Máquinas Eléctricas a nivel internacional, este proyecto nos permitirá avanzar en el desarrollo de una tecnología que explote esta temática a nivel de innovación nacional.

2.2 Importancia de la investigación desde el punto de vista práctico

Los aportes de esta investigación permitirán el diseño e implementación de una estación de pruebas de Máquinas Eléctricas, con la que no se cuenta en el laboratorio de Máquinas Eléctricas. Incluso posee ventajas competitivas frente a algunos de los diseños existentes. Además, este proyecto nos permite actualizar y reformar algunos de los contenidos de cursos de Máquinas Eléctricas y Accionamiento Eléctrico de pregrado y de posgrado.

Así mismo, estará acorde con el estreno del reglamento técnico de etiquetado RETIQ y su entrada en vigencia en agosto de 2016 artículo que se presenta a continuación.

Colombia estrena Etiqueta Energética:



Figura 1. Presentación Director PNUD Etiqueta energética. Fuente: UPME (2016)

(Bogotá, 24 de septiembre) Con la expedición del Reglamento Técnico de Etiquetado, RETIQ, Colombia concreta un trabajo de años en torno a la preparación de la normatividad y de

aspectos asociados a su implementación. Dicho trabajo estuvo liderado por el Ministerio de Minas y Energía, y la Unidad de Planeación Minero Energética –UPME–.

Esta labor ha venido siendo apoyada decididamente por el PNUD (Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo), a través del Proyecto de Normalización y Etiquetado de Eficiencia Energética, ejecutado con recursos donados por el GEF (Fondo para el Medio Ambiente Mundial).

En la firma de la Resolución que expidió el RETIQ, el Ministro de Minas y Energía, Tomás González Estrada, destacó el hecho de que el Reglamento se ciñe a estándares internacionales, y permitirá a los usuarios conocer el consumo de energía de los equipos que adquieren, así como el promedio de ahorro energético que estos les ofrecen.

De esta manera, el Gobierno de Colombia propicia el establecimiento de una cultura de eficiencia energética; la protección de los consumidores y el cuidado del medio ambiente. Además, el jefe de la cartera minero energética agradeció al PNUD y a la UPME su colaboración para que el etiquetado sea una realidad en el país.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Desarrollar una estación de pruebas con base en el RETIQ para máquinas eléctricas.

3.2 Objetivos Específicos

Diseñar la estación experimental para realizar las pruebas a las máquinas eléctricas.

Investigar, y presentar la interface y software más idóneo para capturar los parámetros requeridos y trasladarlos a los computadores seleccionados.

Realizar pruebas a un motor de pequeña potencia seleccionado.

Analizar los resultados de forma comparativa con un medidor del operador de red y los requerimientos exigidos por el Reglamento Técnico de Etiquetado RETIQ y emitir conclusiones al respecto.

Presentación de la estación de pruebas modelo y emitir conclusiones al respecto.

3.3 Delimitación del Proyecto

Flexibilización del proyecto. Teniendo en cuenta los costos del proyecto, los requerimientos de tiempo, las dificultades de adquirir o construir el sistema de adquisición de parámetros eléctricos con su traslado al computador y conociendo la necesidad de laboratorios en la Universidad de Pamplona Sede Villa del Rosario, me he dado a la tarea de ir implementando a lo largo de este proyecto de un laboratorio para Ingeniería Eléctrica acorde con la Maestría realizada denominada, (ESTACIÓN DE PRUEBAS PARA MÁQUINAS ELÉCTRICAS), es por ello que

a continuación presento lo entregado a lo largo de la investigación y como medio para facilitar el conocimiento de varias competencias que tienen que ver con la carrera de Ingeniería Eléctrica tales como, medidas eléctricas, máquinas eléctricas, automatización y mantenimiento eléctrico.

Los equipos, herramientas y materiales son:

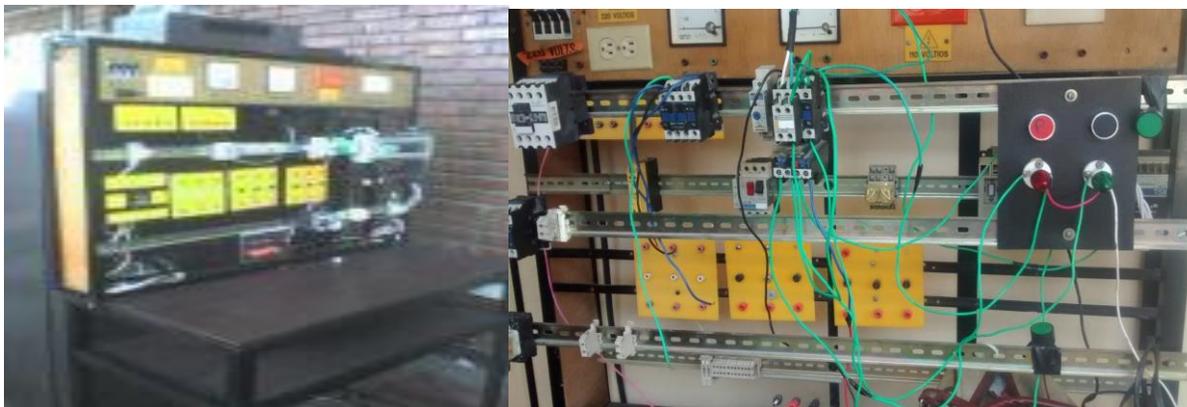


Figura 2. Tablero para conexión del sistema de control y fuerza de motores trifásicos de corriente alterna según diseño realizado. Fuente: El Autor



Figura 3. Osciloscopios para observación y medida de los parámetros de tensión y frecuencia de los motores conectados. Fuente: El Autor



Figura 4. Variador de velocidad, motor y elementos para sistemas de control. Fuente: El Autor



Figura 5. Medidor de energía trifásico el cual incluye diferentes medidas como tensión, corriente en cada una de las fases, potencia, factor de potencia, energía consumida activa y reactiva. Fuente: El Autor

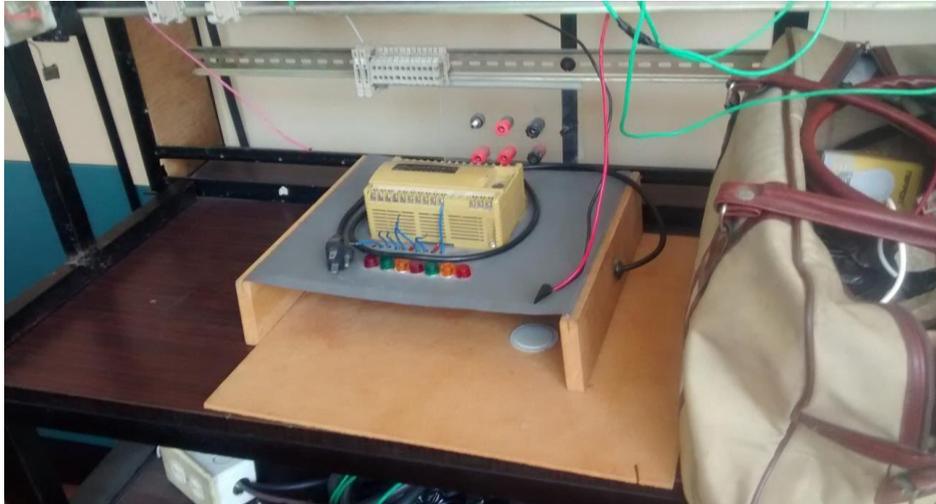


Figura 6. Autómatas programables para prácticas de control en motores. Fuente: El Autor

Finalmente, los estudios propuestos en este proyecto de Maestría se mostrarán en el laboratorio de la Universidad Antonio Nariño acondicionando los módulos, los gabinetes, los tableros, los equipos de medida y motores existentes.

3.4 Acotaciones

En el inicio para la realización del estudio sobre el uso eficiente de la energía eléctrica, se dan a conocer en detalle, los protocolos y requerimientos que exige un trabajo de este tipo.

La realización del estudio sobre el uso de la energía eléctrica se efectuará de forma sistemática y organizada, con toda la ingeniería en detalle.

Las mediciones de los parámetros eléctricos se desarrollarán con base en el equipo de medida instalado siguiendo todos los requerimientos que exigen las buenas prácticas.

4. Principios Generales

4.1 Antecedentes

Estudiar el funcionamiento en régimen estable ha sido durante años el objeto de estudio fundamental en las máquinas eléctricas, pero con los cambios tecnológicos experimentados por la ingeniería eléctrica en los últimos años relacionados con el desarrollo de la electrónica de potencia, las computadoras y los sistemas de adquisición de datos, ha hecho imprescindible el estudio del régimen transitorio de las máquinas eléctricas. Lo anterior, también ha fomentado el uso de las máquinas eléctricas en aplicaciones de control y monitoreo cada día son más frecuente, lo cual ha sido posible, gracias al desarrollo de la tecnología, específicamente a los sistemas de **adquisición de datos**. Estos facilitan la captación y el procesamiento de las señales más importantes de las máquinas.

La adquisición de datos consiste básicamente en captar una señal física y llevarla a una computadora, esto significa tomar un conjunto de variables mensurables en forma física y convertirlas en tensiones eléctricas, de tal manera que se puedan utilizar y/o puedan ser leídas en el PC. Es necesario que la señal física pase por una serie de etapas que le permitan a la computadora ser capaz de interpretar la señal enviada. Una vez que las señales eléctricas se transforman en digitales, se pueden por ejemplo procesar con un programa de aplicación adecuado al usuario. De la misma manera se toma una señal eléctrica y se transforma en una digital, y se puede tomar una señal digital o binaria y convertirla en una eléctrica; de esta manera el PC puede enviar señales hacia dispositivos actuadores.

La estación de pruebas consta básicamente de un gabinete para instalar los motores que requieren efectuar la medición de los parámetros eléctricos que nos permitan definir su eficiencia,

un gabinete para proporcionar el par mecánico en Newton – Metro por medio de un freno magnético, un sistema de adquisición de datos y de control y el software.

4.2 Estado del Arte

El desarrollo de los proyectos de eficiencia energética en Colombia han tenido un gran impacto en su ejecución, a partir de la norma 697 de 2001 promulgada por el congreso en la cual se declara el uso racional y eficiente de la energía (URE) como un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional. Esto ha involucrado varios actores que han participado en la planeación, ejecución, seguimiento y control de los proyectos URE.

Dentro de los cofinanciadores, uno de los más importantes, El Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e innovación COLCIENCIAS, al cual mediante el decreto 3683 de 2003 el gobierno nacional da la facultad para que este organismo a través de los Programas Nacionales del Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología que sean pertinentes, desarrolle estrategias y acciones en conjunto con otras entidades, para crear líneas de investigación y desarrollo tecnológico en el uso racional y eficiente de la energía y/o fuentes no convencionales de energía.

Existen algunos proyectos de grado enfocados al conocimiento de los motores de inducción y las necesidades de crear laboratorios para la docencia en la carrera de Ingeniería Eléctrica. Dentro de estos proyectos mencionaré los siguientes:

Banco de pruebas para motores de inducción. Este es un proyecto co-financiado por el Instituto Colombiano para el desarrollo de la Ciencia Francisco José de Caldas” COLCIENCIAS y la UNIVERSIDAD DEL VALLE. Diseñado entre las escuelas de Ingeniería Mecánica y Eléctricas de la Universidad del Valle. El co-autor es Johnny Posada y los estudiantes Luis Ardila

y Alejandro Forero contribuyeron a través de sus trabajos de grado a la construcción del BPMI. Realizado por Edinson Franco Mejía, Johnny Posada, y José Ramírez Scarpetta con el fin de obtener la Maestría en Automática en la Universidad del Valle Doctorando en Ingeniería Universidad del Valle, e-mail:edinsonfm@univalle.edu.co Director Grupo de Investigación en Control Industrial

4.3 Marco Teórico

4.3.1 Generalidades. El origen del hombre, hace aproximadamente 100.000 años, cambió el consumo de energía que los organismos vivos realizaban hasta esa época. En efecto, hasta ese momento, el consumo energético se reducía a un mínimo, este representaba lo necesario para la alimentación de los diferentes seres vivos. Aparece una especie capaz de transformar el medio ambiente, eso implica un gran consumo de energía, luego se requiere energía para procesos productivos, para procesos sociales (educación, salud, esparcimiento), para desarrollos urbanos, para investigación, entre otras.

El consumo energético se desarrolla al mismo ritmo que lo hace la humanidad, en principio quemando madera y posteriormente amplía su horizonte con el consumo de combustibles fósiles como el gas y el carbón (revolución industrial del siglo XVIII). Actualmente el hombre, en promedio, consume entre 8 a 10 veces más energía que su antecesor de hace 60.000 años. La dependencia que se tiene con los combustibles fósiles es notable, el consumo de petróleo es de 7 veces más actualmente que hace 50 años.

El gran consumo de energía y las necesidades que se prevén para un futuro presentan tres problemas básicos:

Limitaciones de los recursos energéticos (energías no renovables).

Factores económicos (desarrollo → crecimiento económico → mayor consumo de energía).

Efectos ambientales (contaminación y cambio climático).

El concepto de eficiencia energética y uso racional de la energía han tenido varias modificaciones a través de los años. A continuación, en la figura 1 se muestra la evolución de dicho concepto.

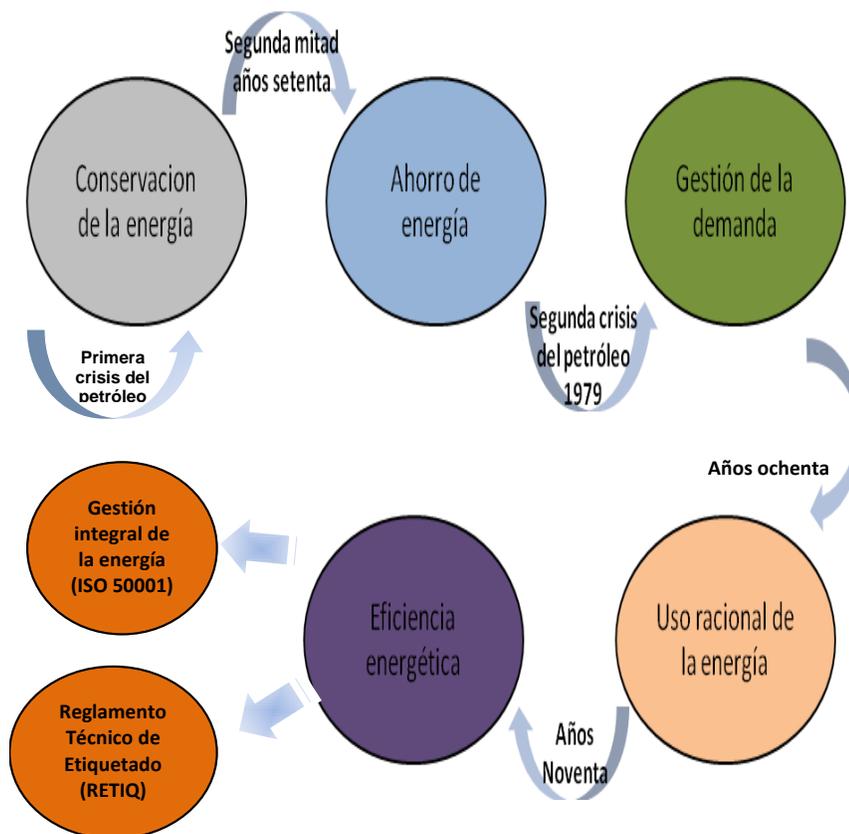


Figura 7. Evolución del concepto de la eficiencia energética. Fuente: El Autor

- **Conservación de la energía (después de la primera crisis del petróleo 1973).** Prima la conservación de los recursos energéticos. Gobiernos y consumidores enfocados a reducir el consumo de energía y la adaptación rápida a las restricciones de la oferta.
- **Ahorro de energía (segunda mitad años setenta).** Evaluación de los resultados de las acciones desarrolladas por los consumidores de energía para reducir su consumo. Las evaluaciones se refirieron al conjunto de la economía para estimar el ahorro a lo largo de periodos anuales. Se empezó a separar los ahorros obtenidos con cambios de estilo de vida y los obtenidos por cambios tecnológicos.
- **Gestión de la demanda (después de la segunda crisis del petróleo 1979).** Se hace referencia a las políticas cuyo objeto era modificar las pautas de la evolución de la demanda de energía a través de mejoras tecnológicas, sustituciones entre energéticos (ejemplo: petróleo por carbón) y uso de energías renovables.
- **Uso racional de la energía (mediados de los años ochenta).** A diferencia de la concepción anterior, se debía buscar que las tecnologías utilizadas para usar mejor la energía respondieran a criterios de mínimo costo. Es decir, los resultados de las medidas de uso racional de la energía debían asegurar el mínimo costo energético para quien lo implementara.
- **Eficiencia energética (Comienzos años noventa).** Se amplía el concepto de uso racional para caracterizar la forma en que se usa la energía en el conjunto de la economía. Las mejoras de eficiencia se refieren a reducciones en la cantidad de energía usada para un mismo nivel de actividad, siendo esta reducción posible por cambio tecnológico o cambios en la gestión y organización de un sector.

- **Gestión integral de la energía (ISO 50001).** Promueve la gestión energética integral en la empresa, la implementación de buenas prácticas operacionales, las auditorías energéticas y la identificación de oportunidades de reconversión tecnológica y optimización de procesos, permitiendo alcanzar el mínimo consumo energético a través de un proceso de mejora continua. El objetivo estratégico es construir una cultura energético-ambiental que permita a la vez el incremento de la competitividad y la reducción del impacto ambiental. Enfatiza la disponibilidad de suministro de energía, confiabilidad, cambio climático y agotamiento de los recursos.

Reglamento Técnico de Etiquetado (RETIQ). “Reglamento Técnico de Etiquetado con fines de Uso Racional de Energía aplicable a algunos equipos de uso final de energía eléctrica y gas combustible, tanto de fabricación nacional como importados, para su comercialización en Colombia.”

Teniendo en cuenta que un gran porcentaje de la investigación tiene como referencia el artículo 12 de RETIQ presento a continuación alguna información contenida en este artículo.

Artículo 12° del RETIQ- Motores Trifásicos. Se establece como parámetro de etiquetado para motores eléctricos trifásicos la **eficiencia**, expresada en %. Definida como la potencia mecánica de salida (medida en el eje) sobre la potencia eléctrica de entrada. Para el efecto se establecen los valores de eficiencia nominal, los rangos para etiquetado, el método de prueba para su evaluación, y los requisitos mínimos de muestreo y aceptación.

La eficiencia debe ser determinada a la potencia nominal P_N , tensión nominal U_N y frecuencia nominal f_N .

Los motores eléctricos de corriente alterna, trifásicos objeto del presente reglamento corresponden a motores de inducción, jaula de ardilla, con potencias nominales desde 0,746 kW hasta 373 kW, voltaje nominal de hasta 600 V, de una sola frecuencia de rotación, abiertos y cerrados; con posición de montaje horizontal o vertical, que se importen o fabriquen para comercializar en el territorio nacional.

4.3.2 Modelo matemático del motor de inducción

Circuito equivalente. En la búsqueda de un circuito equivalente que permita modelar al MI (Motor de Inducción) operando en estado estable, se aprovecha la similitud existente entre el principio de funcionamiento del MI y del transformador. En ambos casos en el circuito secundario (rotor en el caso de la MI) se tienen tensiones y corrientes inducidas debidas al campo variable producido en el primario (estator). Si el MI está en operación se tendrá un efecto adicional a los transformadores motivado por esta "transformación" de la frecuencia de estator a rotor. Estas distribuciones de campo producen una resultante que gira a la misma velocidad induciendo tensiones en ambos bobinados: en el estator a la frecuencia de la fuente f_1 y en el rotor a la frecuencia de deslizamiento $f_2 = sf_1$.

Circuito del Estator. El voltaje de la fuente aplicado al bobinado del estator, difiere del voltaje inducido debido a la caída de voltaje en la impedancia de fuga del estator. Esto es:

$$V_1 = E_1 + I_1(R_1 + jX_1)$$

Donde V_1 es el voltaje de la fuente, E_1 es la tensión inducida o fuerza contraelectromotriz (f_{cem}), I_1 es la corriente del circuito de estator y R_1 y X_1 son la resistencia y reactancia de fuga del estator, respectivamente.

El flujo resultante en el entrehierro es creado por una combinación de las FMM de estator y rotor, como en el caso de los transformadores la corriente de estator, puede ser dividida en dos componentes: una de carga y otra de excitación. La corriente de carga I_2 produce una FMM que exactamente contrarresta la FMM del rotor. La componente de excitación I_ϕ es la requerida para imponer el flujo resultante en el entrehierro y es función de la fem E_1 . Esta corriente de excitación puede ser descompuesta en una corriente asociada a las pérdidas en el hierro I_c que se encuentra en fase con E_1 y una componente de magnetización I_m . El circuito equivalente que representa cada una de estas componentes de la corriente de estator se muestra en la figura 1. Es de notar que no existe diferencia en forma, entre este circuito equivalente y el deducido para el caso del primario del transformador.

La diferencia se encuentra en la magnitud de los parámetros. En efecto, la corriente de excitación es considerablemente más grande que caso del MI, debido a la presencia del entrehierro. En MI ésta puede llegar a ser tan grande como el 30 al 50% de la corriente de estator I_1 dependiendo del tamaño del motor (en el caso de transformadores la corriente de excitación es sólo de entre un 1 a un 5%). Asimismo, la reactancia de fuga es mayor en el caso del MI, debido al entrehierro y al hecho que los bobinados se encuentren distribuidos a lo largo de la periferia del estator (y rotor) mientras en los transformadores están concentrados en un núcleo.

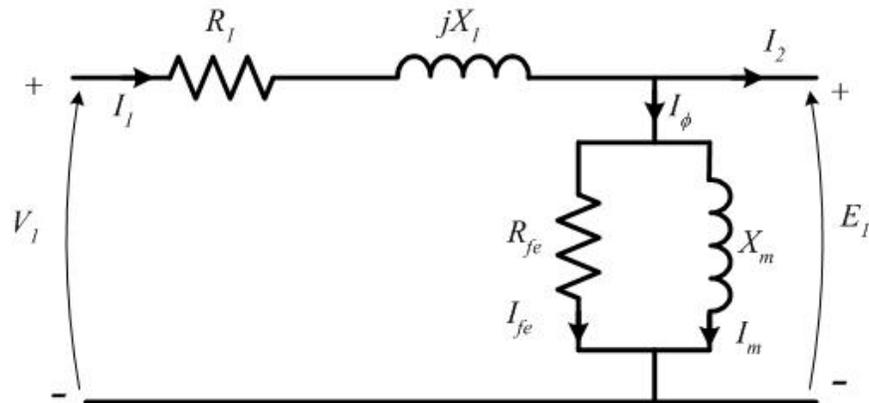


Figura 8. Circuito equivalente del bobinado de estator de una MI. Fuente: Lawrie, 2002.

Circuito del Rotor. Como se sabe, el rotor de jaula reacciona frente a la FMM de estator creando una FMM que tiene el mismo número de polos de la distribución de corrientes del estator y que viaja a la misma velocidad. Esta reacción del rotor induce en los bobinados del estator una tensión el cual resulta en una corriente de compensación (carga) que hace que absorba mayor corriente de la fuente. Esta es la única forma de saber qué es lo que ocurre a través del entrehierro con la interacción entre los flujos de estator y rotor. Figura 8

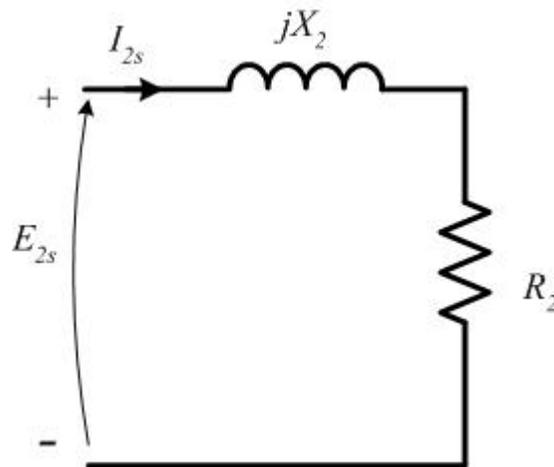


Figura 9. Circuito equivalente del bobinado de rotor equivalente. Fuente: Lawrie, 2002.

Ecuación Equivalente de la MI. Desarrollando las ecuaciones de los circuitos equivalentes

se tiene que:

$$v_i = Ri^2 + \frac{d\left(\frac{L(x)i^2}{2}\right)}{dt} + \frac{1}{2}i^2 \frac{dL(x)}{dt}$$

Diagram illustrating the equivalent circuit equation for an induction motor. The equation is: $v_i = Ri^2 + \frac{d\left(\frac{L(x)i^2}{2}\right)}{dt} + \frac{1}{2}i^2 \frac{dL(x)}{dt}$. The terms are labeled as follows:

- v_i : Potencia Eléctrica de Entrada
- Ri^2 : Potencia Disipada en forma de calor
- $\frac{d\left(\frac{L(x)i^2}{2}\right)}{dt}$: Potencia Almacenada en el Campo Magnético
- $\frac{1}{2}i^2 \frac{dL(x)}{dt}$: Potencia Mecánica

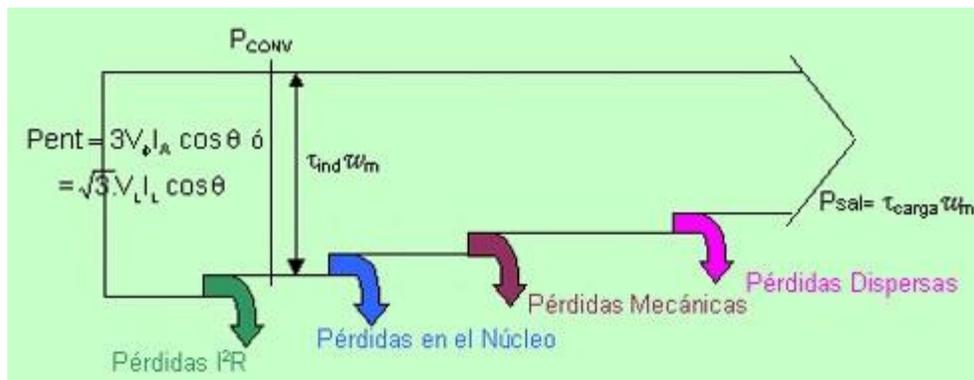


Figura 10. Diagrama de flujo de potencia para un motor A.C. 3. Fuente: Lawrie, 2002.

Por lo tanto, las ecuaciones en estado estable sobre el balance energético del motor de inducción eléctrico trifásico.

Potencia absorbida cuando el motor de inducción eléctrico trifásico está en funcionamiento, el estator se alimenta de la red:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \Phi$$

Donde P_1 : Potencia eléctrica trifásica consumida de la red

V_1 : Tensión de entrada de la red

I_1 : Intensidad de corriente consumida por el motor

$\cos\Phi$: Factor de potencia en el motor

Perdidas en el cobre I^2R :

Teniendo en cuenta que parte de la P_1 se consume (disipa) en la resistencia R del devanado del estator ocasionando una pérdida eléctrica ΔP_{el1} ,

Pérdidas en el núcleo:

También sabemos que existe una pérdida magnética en el campo del estator ΔP_{mag} . Por lo tanto si restamos dichas componentes, encontramos que al rotor se le aplica una potencia electromagnética, que se expresa mediante la siguiente ecuación de balance energético:

$$P_{elmag} = P_1 - \Delta P_{el1} - \Delta P_{mag}$$

Así mismo como parte de esta potencia electromagnética se disipa en cubrir las pérdidas eléctricas del rotor ΔP_{el2} en su devanado, tenemos que la potencia resultante es aquella que va a ser convertida en potencia mecánica, y está expresada por la siguiente ecuación:

$$P_{mec} = P_{elmag} - \Delta P_{el2}$$

Lo que se busca es verificar que un motor que requiera entregar una potencia mecánica determinada al sistema o proceso, utilice una potencia eléctrica de entrada cada vez menor. Información importante a tomar de los motores que se llevarán al banco de pruebas datos nominales de los motores eléctricos.

Potencia, KW Ó HP

Tensión de servicio, kV ó V

Frecuencia, Hz

Velocidad nominal, r.p.m.

Corriente nominal, Amp.

Corriente de arranque. Amp.

Factor de potencia, $\cos \Phi$

Resistencia de bobinados

Impedancia de bobinados

Eficiencia, $\eta\%$

Sistema de fuerza. En una planta industrial, se denomina sistema de fuerza al conjunto de todos los equipos e instalaciones que tiene por objeto realizar un trabajo mecánico y/o de producción. El equipo eléctrico que puede realizar trabajo mecánico es el motor eléctrico, y por lo tanto son estos equipos los principales dentro del proceso de producción. El sistema de fuerza a su vez, en una planta es alimentado con energía desde una subestación de distribución del servicio público de electricidad. Por lo anterior se observan la importancia de las máquinas eléctricas en la industria. Cabe señalar que los sistemas de refrigeración y calefacción también forman parte del sistema de fuerza en una instalación eléctrica de tipo industrial. En el caso de los

sistemas de uso residencial - comercial, el sistema de fuerza está conformado por los circuitos principales de iluminación, aire acondicionado y sistemas auxiliares (bombas, ascensores, etc.).

La importancia de un deslizamiento (s) en motores bajo para obtener una alta eficiencia. Para que un motor funcione en su régimen nominal con una alta eficiencia, es necesario que en este régimen se tenga un deslizamiento s de pequeña magnitud. Por lo general $S_{nom} = 0.01 - 0.06$, para ello el devanado del rotor lo diseñan de tal forma que tenga una resistencia óhmica pequeña.

El devanado del rotor también es trifásico (o polifásico) y se coloca en la superficie del cilindro. En el caso simple se une en corto circuito.

Cuando el devanado del estator es alimentado por una corriente trifásica, se induce un campo magnético giratorio, cuya velocidad (síncrona) es:

$$n_1 = 60 f_1 / p$$

Diagrama energético del motor eléctrico. Cuando el motor está en funcionamiento, el estator se alimenta de la red y absorbe una potencia:

$$P_1 = M_1 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\Phi_1$$

Parte de la P_1 se consume (disipa) en la resistencia R del devanado del estator ocasionando una pérdida eléctrica (P_{el}), así como una pérdida magnética en el Campo del estator (P_{mag}), deduciendo dichas componentes, al rotor se le aplica una potencia electromagnética, que se expresa mediante la siguiente ecuación de balance energético:

$$P_{emag} = P_1 - P_{el} - P_{mag}$$

Parte de esta potencia se disipa en cubrir las pérdidas eléctricas del rotor P_{el2} en su devanado, la potencia resultante es aquella que va a ser convertida en potencia mecánica, expresado por:

$$P_{mec} = P_{el\,mag} - P_{el2}$$

Pérdidas: $P_{el\,est} + P_{el\,rot} + P_{fric} + P_{adic}$

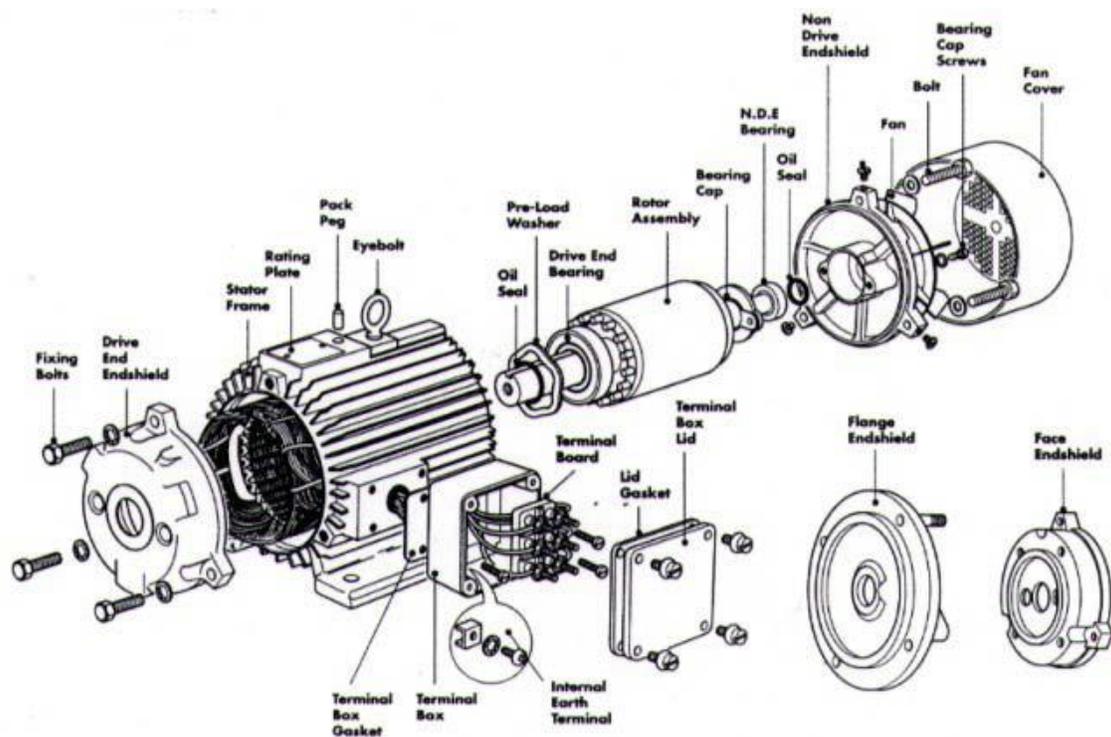


Figura 11. Despiece de un motor eléctrico trifásico de inducción tipo jaula de ardilla.

Fuente: Manual Siemens

Máquinas de inducción trifásica. Las máquinas de inducción (MI) son las más usadas en la industria gracias a su robustez, mínimos o nulos requerimientos de manutención y menores costos de operación ya que pueden operar directamente conectadas a la red eléctrica (frecuencia y voltaje constante), permitiendo accionar cargas a una velocidad esencialmente constante. Cuando es usada con control por campo orientado puede alcanzar un control preciso tal como es

encontrado en el motor de corriente continua además de entregar la posibilidad de operación en la zona de campo debilitado.

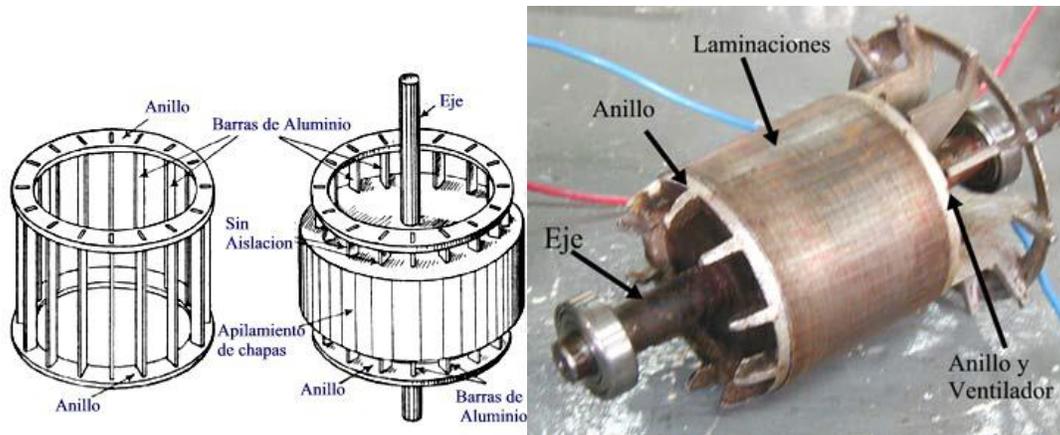
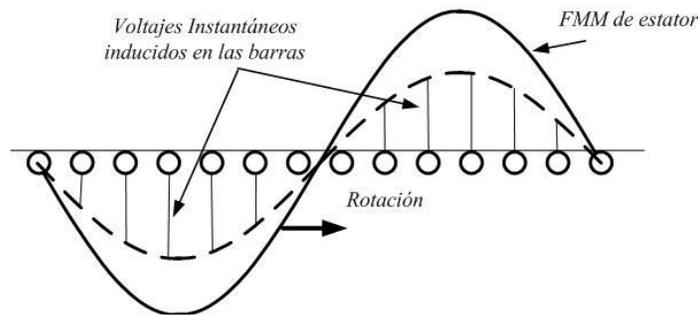


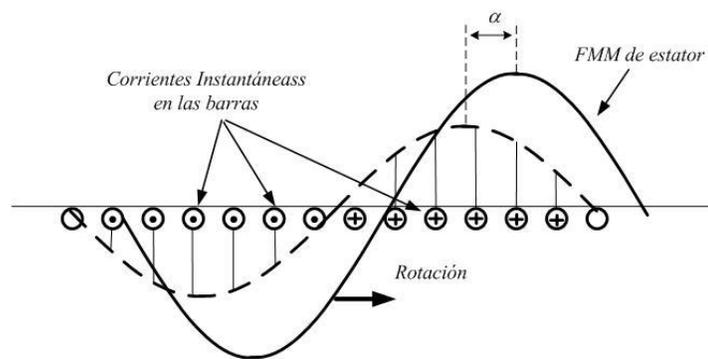
Figura 12. Motor tipo Jaula de Ardilla. (a) Barras embebidas en el fierro y anillos, (b) Rotor sólido. Fuente: Manual Siemens

Construcción. El circuito magnético de un MI trifásico está compuesto por la parte estacionaria o Estator y la móvil o rotor. Rotor y estator están separados por un pequeño entrehierro que va desde los 0.4 a los 4 mm dependiendo de la potencia de la máquina. El estator posee geometría cilíndrica consiste en un apilamiento de laminaciones de 'fierro eléctrico' en las cuales se practican ranuras donde se ubican los bobinados trifásicos. El rotor también está compuesto de laminaciones con ranuras, el rotor tipo jaula de ardilla, se inyecta aluminio fundido sobre las chapas de rotor apilada formándose barras longitudinales las que en el mismo proceso quedan cortocircuitadas en ambos extremos, por sendos anillos como es mostrado en la figura 11a. Se obtiene así un "bobinado" que no tiene aislación y que se encuentra embebido en el hierro del rotor. Como el circuito es cerrado sobre sí mismo, sin conexiones externas, resulta ser de alta confiabilidad y robustez. Figura 11

La figura 12a se observa la FMM de estator moviéndose hacia la derecha a la velocidad sincrónica, ω_s , por lo anterior sobre cada barra del rotor se inducirán tensiones instantáneas del tipo $e_i = K(\omega_s - \omega_m)B$ (7) que conformarán una senoide como la indica en línea de trazos. Al estar cortocircuitadas estas barras, tenderán a circular corrientes que retrasaran a la e_i en un ángulo α . Es decir, cuando la onda de FMM se haya desplazado a la derecha un ángulo α , el perfil de corrientes coincidirá con el de tensión, según se observa en la figura 12b La FMM generada por estas corrientes de rotor quedará desfasada de la onda de FMM de estator en un ángulo $90 + \alpha$ como lo indica la figura 12c.



(a)



(b)

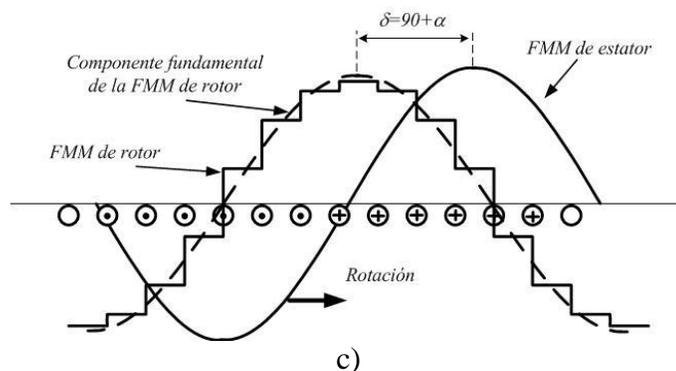


Figura 13. FMM y corrientes en el rotor jaula de ardilla. Fuente: Lawrie, 2002.

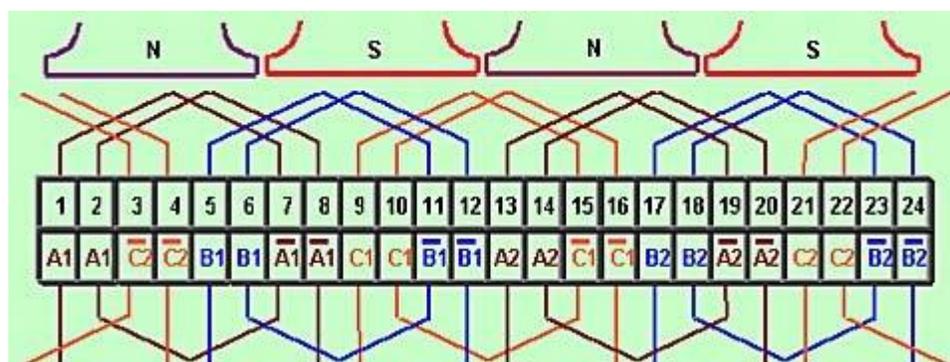


Figura 14. Bobinado típico de un motor de inducción trifásico de C.A. Fuente: Lawrie, 2002.

Teniendo en cuenta la importancia que tiene el valor de la potencia eléctrica en el análisis de los motores a continuación presento una investigación sobre los valores de placa con que se muestra la potencia de estos.

Explicación del valor dado a los caballos fuerza y porque se está dejando de colocar en la placa de los motores eléctricos.

Sabemos que Caballos de fuerza es el nombre dado como unidad de medición de la potencia, la cual se refiere a la velocidad con la que se realiza un trabajo. El factor de conversión más común, sobre todo para la energía eléctrica, es de 1 hp = 746 watts. El término fue adoptado en el

siglo 18 por el ingeniero escocés James Watt para comparar la salida de las máquinas de vapor con la potencia de caballos de tiro. Más tarde se amplió para incluir la potencia de salida de los otros tipos de motores de pistón, así como turbinas, motores eléctricos y otro tipo de maquinaria. La definición de la unidad varía entre regiones geográficas. Actualmente la mayoría de los países utilizan la unidad watt (SI) para la medición de potencia.

Con la aplicación de la Directiva 80/181/CEE de la UE el 1 de enero de 2010, el uso de los caballos de fuerza en la UE sólo se permite como unidad suplementaria (SaludBlog, 2017).

La potencia, es la razón por la cual se ejerce un trabajo y se mide en kilovatios en el sistema métrico o en caballos en el sistema imperial o británico. El término de potencia lo concibió hace 200 años James Watt, quien quería saber la rata a la cual los caballos de tiro podían alzar el carbón en las minas.

Un julio (Joule) es el trabajo hecho por la fuerza de un newton para mover un objeto en la distancia de un metro. De ahí que el torque del motor se exprese en newton/metro (N-m) o en libras/pie si se trata de la medición imperial.

Como la medida de la potencia en los motores se da indistintamente en caballos o en kilovatios, cabe anotar que un caballo equivale a 0.746 kilovatios. O sea, un motor que da 100 caballos, produce 74.6 kilovatios. O viceversa: Un motor que está catalogado como de 100 kilovatios, es lo mismo que si se dice que tiene 134.1 caballos de potencia tradicionales (Diario El Tiempo, 2008).

Tomado de la norma DIN 66036. Esta norma define un caballo de fuerza métrico como el poder para levantar una masa de 75 kilogramos contra la fuerza gravitacional de la Tierra a una

distancia de un metro en un segundo, lo que equivale a 735,49875 W o 98.6% de la potencia mecánica imperial.

Ecuación 1:

$$CV = \text{Kgf} \times m / 75 \times s$$

Dónde:

Kgf=masa a levantar contra la fuerza gravitacional=9.8

m=Altura hasta donde se levanta

s=Tiempo en segundos utilizado

Caballos de vapor: es una unidad o medida de potencia de una máquina, que representa el esfuerzo necesario, (o la potencia necesaria), para elevar verticalmente una masa de 75 kg a la velocidad de 1 m/s. o sea levantar los 75 kg. a 1 m de altura, en 1 s.

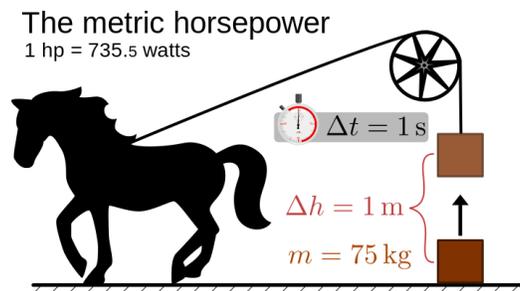


Figura 15. La medida de caballos de poder. Fuente: Wikipedia, 2015

Sabemos que por la tercera definición CGPM (Conferencia General de Pesos y Medidas) la gravedad estándar tiene un valor de $g=9,80665$ (Wikipedia, 2016).

Las ecuaciones que relacionan dimensionalmente el vatio con las unidades básicas del Sistema Internacional son:

En términos de la mecánica clásica:

$$F = m \cdot a = \text{Kg} \cdot \text{m/s}^2 = \text{N}$$

$$\text{N} = \text{Kg} \cdot \text{m/s}^2$$

Donde

F= Fuerza aplicada

N=Newton

a = Aceleración

m = Desplazamiento

Cuando la fuerza es aplicada para elevación

$$F = m \cdot g = \text{Kg} \cdot 9,80665 \text{m/s}^2 = \text{Kgf}$$

Y como:

$$\text{N} = \text{Kg} \cdot \text{m/s}^2$$

Por lo tanto:

$$\text{Kgf} = 9,80665 \text{N}$$

Así mismo:

$$W = \frac{J}{s} = \frac{N \cdot m}{s} = \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$$

Donde:

W= Vatios

J= Julios= N.m

Kgf = mg=9,80665N= 9,80665 kg* m/s²,

1 CV = 735,49875 W. En Francia se adopta 735,5 W

1 HP = 745,6987158227022 W

1 HP = 1,0138 CV

1 CV = 0,9863 HP

Por lo tanto:

Ecuación 2:

CV=75 kg (9,80665m/s²) (m/s) =735, 49875 (kg*m/s²)*m/s

Y de acuerdo con la siguiente ecuación

1 W = 1 J/s = 1 Nm/s = 1 (kg*m/s²)*m/s

Donde:

W = Potencia en vatios

N= Fuerza en Newton

J = Trabajo en julios

m= Metros a elevar

S=Tiempo que se requiere

Luego:

$$W = (\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2) \cdot \text{m}/\text{s} = \text{Kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3$$

Y como en la ecuación 2 encontramos que

$$\text{CV}=735,49875 (\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2) \cdot \text{m}/\text{s} = 735,49875 \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3$$

Tenemos que:

$$\text{CV}=735,49875 \text{ W}$$

Y dado que:

$$1 \text{ HP} = 1,0138 \text{ CV}$$

$$\text{Entonces H.P.} = (735,49875)(1,0138) \text{W}$$

Concluimos que un H.P. es aproximadamente igual a 746 w.

4.3.3 Estimación de los parámetros de motores de inducción a partir de las medidas de pérdidas de potencia. La nueva norma de etiquetado en Colombia (RETIQ) requiere que los motores de inducción especifiquen su eficiencia en condiciones nominales. La comisión

internacional de electrotecnia (CIE) indica tres formas de calcular la eficiencia de motores de inducción. Una de estas formas considera en detalle cada una de las pérdidas de potencia en el motor. Es claro que, desde el punto de vista del fabricante, sería muy ventajoso conocer en detalle cada una de las pérdidas de potencia, con el fin de mejorar la eficiencia del motor. Adicionalmente, las mediciones hechas para el cálculo de las pérdidas de potencia proveen suficiente información para estimar los parámetros eléctricos de los motores de inducción, usando algoritmos de optimización. En este trabajo se explora la estimación de los parámetros del motor de inducción a partir de las medidas indicadas por la CIE para estimar las pérdidas de potencia en motores de inducción.

El ministerio de minas y energía de Colombia expidió el Reglamento Técnico de Etiquetado Energético – RETIQ, el cual requiere que diversos equipos eléctricos, entre ellos los motores de inducción, deban indicar su eficiencia nominal en la etiqueta. Las normas de la Comisión Internacional de Electrotecnia (CIE) indican tres mecanismos por los cuales se puede estimar la eficiencia de los motores de inducción. Uno de estos mecanismos permite estimar cada una de las pérdidas del motor: pérdidas por efecto Joule en el estator y en el rotor, pérdidas en el hierro, pérdidas por fricción, y pérdidas adicionales. Es claro que para los fabricantes de motores de inducción sería muy ventajoso conocer en detalle estas pérdidas, ya que les permitiría mejorar la eficiencia de los motores, enfocándose en reducir las pérdidas con mayor peso sobre la eficiencia del motor. De este modo, las mediciones indicadas por la CIE permitirían no solo cumplir con la norma de etiquetado RETIQ, sino además proveerían información detallada al fabricante para mejorar la eficiencia del motor y ser más competitivos comercialmente. Adicionalmente, como se muestra en este artículo, las medidas indicadas por la CIE permitirían estimar los parámetros eléctricos de los motores de inducción usando algoritmos de optimización avanzados. Los

parámetros eléctricos estimados proveerían información adicional a los fabricantes de motores de inducción que les permitiría mejorar el funcionamiento de los mismos, ya que se podrían simular transitorios así como también las pérdidas de potencia a cualquier condición de carga.

Cálculo de las pérdidas

La universidad Antonio Nariño sede Cúcuta cuenta con una estación de pruebas *LabVolt* la cual cuenta con un motor trifásico de inducción de 4 polos, 350 W, 220 V y 1.2 A. La estación de prueba también cuenta con una interface a un computador y software especializado que permite medir y visualizar información acerca del voltaje aplicado por fase al motor, la corriente por fase, el factor de potencia por cada fase, y el par de salida del motor en Nm. El software también permite controlar el par aplicado al motor. Usando esta estación de pruebas se tomaron medidas para el cálculo de las pérdidas del motor, siguiendo la norma CIE 60034-2-1 (International Electrotechnical Commission, 2007).

La norma CIE considera varios métodos y procedimientos para la determinación del rendimiento de motores de inducción. El método seleccionado en este trabajo es la suma de pérdidas de potencia con medida del par, dado que la estación de prueba permite medir el par aplicado al motor. Es importante destacar aquí que el propósito de este trabajo no es el de proveer una estación de prueba de la eficiencia del motor según la norma CIE, la cual requiere equipos de medida con una precisión del 0.2%, sino mostrar que en base a las medidas indicadas por la norma es posible estimar también los parámetros eléctricos de los motores de inducción.

Las primeras pérdidas que se estiman según la norma CIE son las debidas al rozamiento y ventilación. Para ello se grafican las pérdidas constantes en función del voltaje aplicado al cuadrado, tomando por lo menos 7 valores de voltaje, incluyendo el nominal. Las pérdidas

constantes corresponden a las pérdidas en vacío menos las pérdidas en el cobre. Las pérdidas en el cobre se determinan a partir de la corriente por fase y la resistencia medida del estator (12.2Ω). Las pérdidas por rozamiento y ventilación corresponden a las pérdidas de potencia que existirían a una tensión de 0 V. Como se observa en la figura 16, las pérdidas por rozamiento y ventilación estimadas son de 11.4 W.

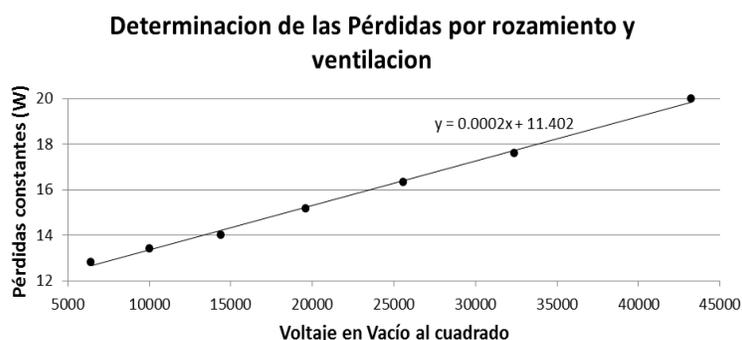


Figura 16. Pérdidas en vacío para 7 valores distintos de tensión. Fuente: El Autor

Las pérdidas en el hierro se obtienen restando las pérdidas por rozamiento y ventilación a las pérdidas en vacío. La figura 17 muestra las pérdidas en el hierro en función de la tensión al cuadrado.

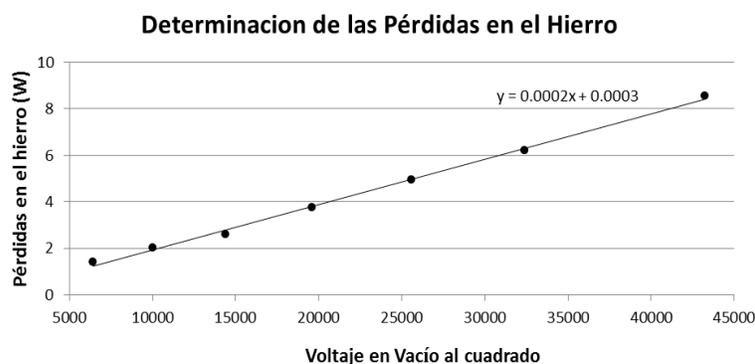


Figura 17. Pérdidas en el hierro para 7 valores distintos de tensión. Fuente: El Autor

Para las pruebas bajo carga, se emplean al menos 6 valores diferentes del par, incluyendo el par nominal. Las pérdidas bajo carga en el cobre del estator se obtienen de la resistencia por fase medida y la corriente por fase medida. Las pérdidas bajo carga en el cobre del rotor se obtienen restando a la potencia absorbida, las pérdidas en el cobre del estator más las pérdidas en el hierro; esta potencia se refiere al rotor multiplicando por el factor de deslizamiento $s = (1800 - RPM)/1800$, donde RPM corresponde a la velocidad en revoluciones por minuto, bajo carga.

Finalmente, las pérdidas residuales correspondientes a la potencia absorbida menos la potencia útil del motor (par en Nm por velocidad en rad/s) menos las pérdidas en el cobre tanto del estator como del rotor, menos las pérdidas en el hierro, menos las pérdidas por rozamiento y ventilación. Las pérdidas residuales se grafican en función del par al cuadrado para obtener la pendiente indicada en la Figura 18. Las pérdidas adicionales se calculan multiplicando la pendiente hallada por el par al cuadrado.

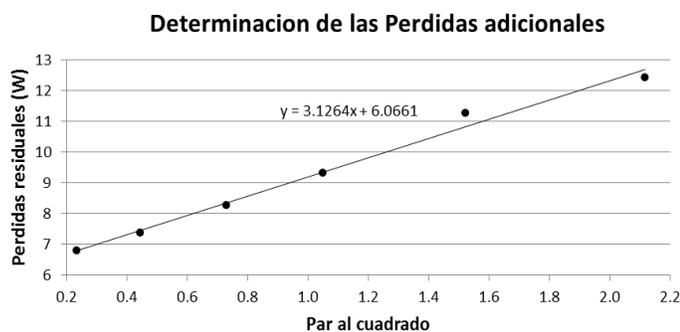


Figura 18. Pérdidas residuales para 6 valores distintos del par. Fuente: El Autor

La figura 19 indica la distribución de las pérdidas de potencia, a la tensión nominal. A partir de la suma de pérdidas se calcula la eficiencia del motor a la tensión nominal. En este caso, la

eficiencia se calcula como $\eta = (P_{ab} - P_{cu1} - P_{cu2} - P_H - P_f - P_a) / P_{ab}$ donde P_{ab} es la potencia absorbida, P_{cu1} las pérdidas en el cobre del estator, P_{cu2} las pérdidas en el cobre del rotor, P_H las pérdidas en el hierro, P_f las pérdidas por fricción y P_a las pérdidas adicionales. La eficiencia del motor calculada por este método fue de 0.71. Este valor es bastante cercano al calculado mediante el método directo, donde se mide la potencia absorbida y la útil, en cuyo caso $\eta = P_{util} / P_{ab}$, correspondiente a una eficiencia de 0.72.

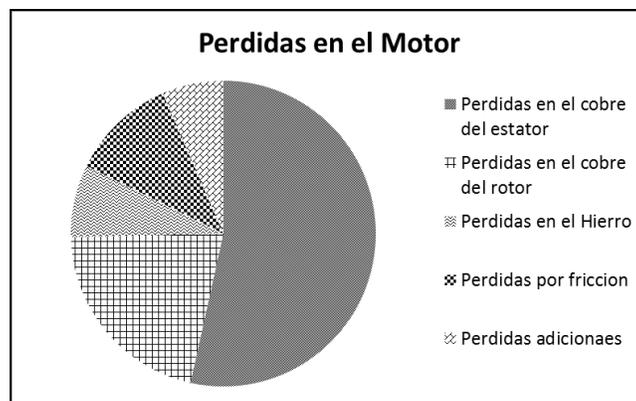


Figura 19. Distribución de las pérdidas del motor a la tensión nominal. Fuente: El Autor

Estos resultados indican que se puede obtener una medida precisa de la eficiencia del motor usando el método de la suma de pérdidas con medida de par, con la gran ventaja de obtener adicionalmente información detallada de cada una de las pérdidas de potencia. En este caso, como se observa en la figura 19, más del 50% de las pérdidas del motor corresponden a las pérdidas en el cobre del estator. Para aumentar la eficiencia de este motor sería aconsejable reducir las pérdidas en el cobre del estator mediante el uso de un calibre mayor.

Estimación de los parámetros del motor

El problema inverso de estimar los parámetros del motor de inducción a partir de medidas de voltaje, corriente, factor de potencia, par, velocidad, ha sido objeto de intenso estudio en el pasado. En particular, se ha encontrado que los algoritmos de búsqueda global, basados en poblaciones, proveen resultados muy superiores a los algoritmos de búsqueda local (Ursem & Vadstrup, 2004).

Más aun, los algoritmos más complejos sobrepasan en desempeño a los algoritmos más simples (Ursem & Vadstrup, 2004). lo que justifica el uso de algoritmos avanzados para la estimación de los parámetros eléctricos de los motores de inducción.

En la categoría de algoritmos avanzados de búsqueda global usados para la estimación de los parámetros del motor de inducción están los algoritmos genéticos (genetic algorithms), la optimización por nube de partículas (particle swarm optimization), el algoritmo de optimización cucú (cuckoo optimization algorithm, algoritmo de optimización del enjambre de abejas (guided artificial bee colony algorithm), algoritmo de búsqueda de armonía (Harmony Search Algorithm), algoritmos evolutivos (evolutionary algorithms), redes neuronales (neural networks), evolución

diferencial (differential evolution), , algoritmo de forraje bacterial (bacterial foraging algorithm), y algoritmo inmune (immune algorithm)

No se consiguió implementación alguna del algoritmo de optimización del enjambre de abejas ni el de forraje bacterial. Los demás algoritmos se encontraron implementados en Matlab. Sin embargo, el algoritmo de optimización cucú presenta un error de código y por lo tanto no fue usado en este trabajo. Se probó el algoritmo de optimización por nube de partículas acotado pero arrojó resultados muy pobres y con mucha variabilidad así que no es referenciado en este trabajo. Igualmente el algoritmo inmune no acepta restricciones en los parámetros por lo cual produce valores negativos de los parámetros del motor. Los demás algoritmos si aceptan restricciones en los parámetros del motor y produjeron estimados razonables de los parámetros del motor. Además de los algoritmos anteriores se utilizaron también el algoritmo de recocido simulado (simulated annealing) y el de umbral de aceptación (threshold acceptance) dado que están disponibles en la librería de optimización de Matlab.

La siguiente figura indica los parámetros eléctricos del motor, por fase:

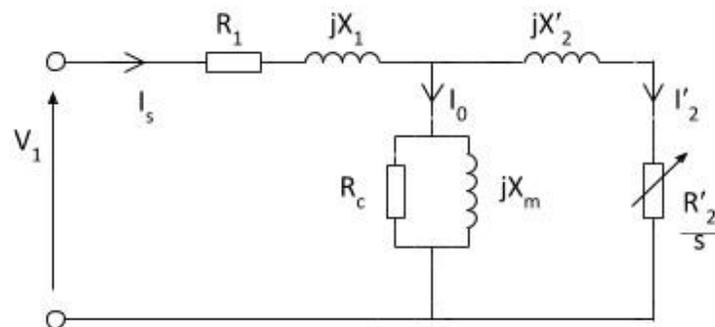


Figura 20. Parámetros de un motor de inducción referidos al estator. Fuente: El Autor

Como se indicó anteriormente, R_1 se mide directamente (12.2Ω), por lo tanto los parámetros a estimar son la inductancia del estator X_1 , la inductancia del rotor X_2 , la resistencia del rotor R_2 , la resistencia equivalente del hierro R_c , y la reactancia del hierro X_m . Todos los algoritmos de optimización utilizados aquí buscan minimizar una función de costo que incluye estos parámetros eléctricos y las medidas realizadas para determinar las pérdidas del motor. La función de costo que utiliza los datos tomados para calcular las pérdidas del motor y los parámetros del motor está dada por las siguientes ecuaciones:

$$z_2(\mathbf{i}) = \frac{R_2}{s(\mathbf{i})} + jX_2 \quad (1)$$

$$z_1 = R_1 + jX_1 \quad (2)$$

$$z_{eq}(\mathbf{i}) = \frac{1}{\frac{1}{R_c} - \frac{j}{X_m} + \frac{1}{z_2(\mathbf{i})}} \quad (3)$$

$$z_{in}(\mathbf{i}) = z_1 + z_{eq}(\mathbf{i}) \quad (4)$$

$$\hat{I}_s(\mathbf{i}) = \frac{V_1(\mathbf{i})}{z_{in}(\mathbf{i})} \quad (5)$$

$$\hat{f}_p(\mathbf{i}) = \frac{\text{real}\{I_s(\mathbf{i})\}}{|I_s(\mathbf{i})|} \quad (6)$$

$$E_c = V_1(\mathbf{i}) - I_s(\mathbf{i})z_1 \quad (7)$$

$$I_c(\mathbf{i}) = \frac{E_c(\mathbf{i})}{R_c} \quad (8)$$

$$\hat{P}_c(\mathbf{i}) = 3R_c |I_c(\mathbf{i})|^2 \quad (9)$$

$$I_m(\mathbf{i}) = \frac{E_c(\mathbf{i})}{jX_m} \quad (10)$$

$$I_0(\mathbf{i}) = I_c(\mathbf{i}) + I_m(\mathbf{i}) \quad (11)$$

$$\hat{I}_2(\mathbf{i}) = \hat{I}_s(\mathbf{i}) - I_0(\mathbf{i}) \quad (12)$$

$$\hat{P}_{util}(\mathbf{i}) = 3R_2 \frac{1-s(\mathbf{i})}{s(\mathbf{i})} |\hat{I}_2(\mathbf{i})|^2 \quad (13)$$

$$\hat{P}_{cu1}(\mathbf{i}) = 3R_1 |\hat{I}_s(\mathbf{i})|^2 \quad (14)$$

$$\hat{P}_{cu2}(\mathbf{i}) = 3R_2 |\hat{I}_2(\mathbf{i})|^2 \quad (15)$$

Donde i es un índice correspondiente a cada una de las mediciones efectuadas para el cálculo de las pérdidas del motor, según la norma CIE. La función de costo E viene dada por:

$$E_1 = \sum_{i=1}^{13} \left[\left(\frac{I_s(\mathbf{i}) - \hat{I}_s(\mathbf{i})}{I_s(\mathbf{i})} \right)^2 + \left(\frac{\hat{f}_p(\mathbf{i}) - f_p(\mathbf{i})}{f_p(\mathbf{i})} \right)^2 + \left(\frac{\hat{P}_c(\mathbf{i}) - P_c(\mathbf{i})}{P_c(\mathbf{i})} \right)^2 \right] \quad (16)$$

$$E_2 = \sum_{i=1}^6 \left[\left(\frac{\hat{P}_{util}(\mathbf{i}) - P_{util}(\mathbf{i})}{P_{util}(\mathbf{i})} \right)^2 + \left(\frac{\hat{P}_{cu1}(\mathbf{i}) - P_{cu1}(\mathbf{i})}{P_{cu1}(\mathbf{i})} \right)^2 + \left(\frac{\hat{P}_{cu2}(\mathbf{i}) - P_{cu2}(\mathbf{i})}{P_{cu2}(\mathbf{i})} \right)^2 \right] \quad (17)$$

$$E = E_1 + E_2. \quad (18)$$

Dado que según la norma CIE el número mínimo de experimentos a realizar en vacío es 7 y bajo carga 6, tenemos 13 experimentos para los cuales tenemos medidas de voltaje (v_1) corriente

en el estator (I_s), factor de potencia (f_p), y potencia absorbida, de la cual se deducen las pérdidas en el hierro (P_c) y las pérdidas en el cobre (P_{cu1}, P_{cu2}) bajo carga. En los ensayos bajo carga se mide también la potencia útil.

La tabla 1 muestra los parámetros estimados usando 5 algoritmos de optimización diferentes. En particular, el algoritmo genético híbrido (combinando el algoritmo genético con un algoritmo de búsqueda local) arrojó buenos resultados, igualmente el algoritmo de búsqueda de armonía. Es importante destacar que aun cuando el algoritmo de evolución diferencial obtiene el menor valor para la función de costo E, predice un valor de cero para X_2 , lo cual no tiene sentido físico. Los mejores resultados se obtuvieron cuando se restringió (constrained minimization) el rango de valores que cada parámetro puede tomar a:

$$0 \leq X_1 \leq 100,$$

$$200 \leq R_c \leq 5K,$$

$$1 \leq X_m \leq 1K,$$

$$1 \leq R_2 \leq 100,$$

$$0.1 \leq X_2 \leq 100.$$

Rangos aproximados de valores para R_c y X_m se pueden obtener del ensayo en vacío considerando la caída en R_1 despreciable. Los demás rangos son razonables y se pueden obtener de los resultados de los algoritmos de optimización, ya que cuando el rango tomado es incorrecto,

los parámetros estimados toman el valor de uno de los límites, indicando que el rango no es apropiado.

Tabla 1. Parámetros estimados del motor de inducción (Ω)

	Hybrid GA	Differential Evolution	Harmony	Simulated Annealing	Threshold Acceptance
X1	6,5	0,0	7,0	3,6	13,0
Rc	4582,3	4988,2	4540,0	4875,2	4319,5
Xm	156,3	162,8	156,1	162,9	163,2
R2	9,7	10,6	9,7	10,3	10,3
X2	14,7	23,5	14,1	16,3	59,4
E	1,994	1,991	1,994	2,018	2,677

A pesar de que el algoritmo genético híbrido y el algoritmo de búsqueda de armonía dan resultados muy similares y el mismo valor de la función de costo, consideramos que el algoritmo de búsqueda de armonía es superior al algoritmo genético híbrido pues en varias ocasiones el algoritmo genético arrojó los mismos resultados que el algoritmo de evolución diferencial, es decir una reactancia del estator de cero. Por otro lado, en las 50 simulaciones del algoritmo de búsqueda de armonía el valor de x_1 nunca fue de cero. Por lo tanto, de ahora en adelante consideraremos que los parámetros estimados del motor son los obtenidos usando el algoritmo de búsqueda de armonía.

Motor de inducción modelado en Matlab

La figura 21 muestra el circuito equivalente del motor de inducción modelado en Matlab usando la librería SimPowerSystems, con los parámetros indicados en la tabla 1 para el algoritmo de búsqueda de armonía. El interruptor se agrega para simular el transitorio de la corriente del estator cuando se arranca el motor bajo condiciones nominales. La figura 22 muestra la simulación del transitorio en la corriente del estator bajo condiciones nominales.

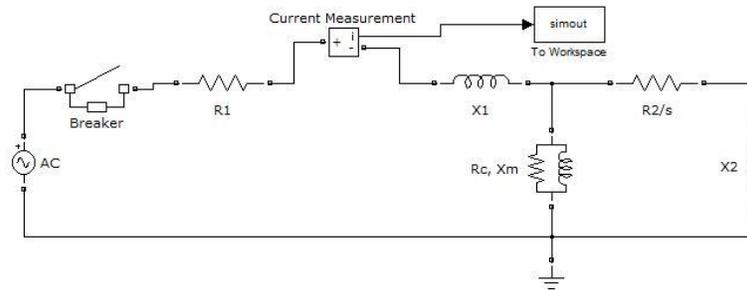


Figura 21. Simulación en Matlab del circuito equivalente. Fuente: El Autor

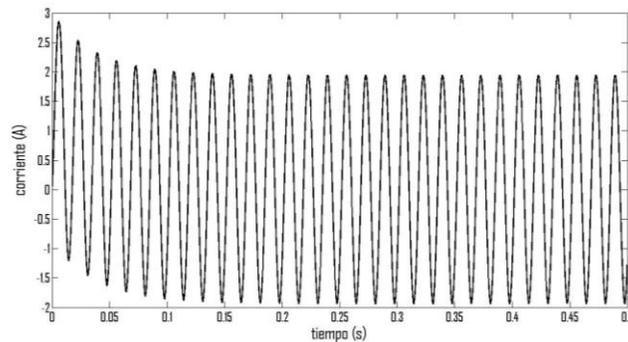


Figura 22. Transitorio de la corriente del estator. Fuente: El Autor

Matlab ofrece un modelo del motor de inducción trifásico en la librería SimPowerSystems. La figura 23 muestra el modelo del motor trifásico alimentado con los parámetros hallados usando el algoritmo de búsqueda de armonía. Se observa que se le aplicó el par nominal (1.455 Nm). El modelo arroja 21 variables medidas del motor de inducción. En la figura 23 se muestra un bus selector que selecciona 4 de las 21 variables: corriente en el rotor, corriente en el estator, velocidad del rotor y par electromagnético. La figura 24 muestra el transitorio en la corriente del rotor.

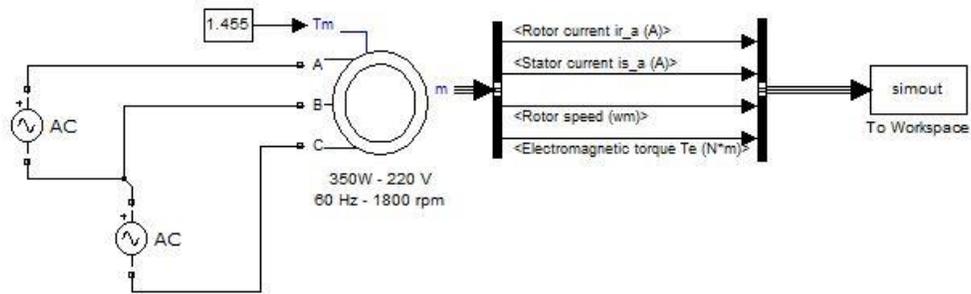


Figura 23. Simulación en Matlab del motor de inducción. Fuente: El Autor

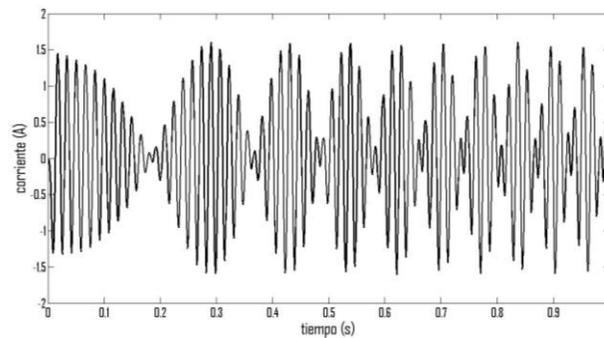


Figura 24. Transitorio de la corriente en el rotor. Fuente: El Autor

La nueva norma de etiquetado en Colombia requiere que los fabricantes tomen conciencia de la eficiencia energética que sus equipos ofrecen. En particular, se ha demostrado aquí que usando el método de la suma de pérdidas con medida de par de la norma CIE para motores de inducción, es posible no solo identificar donde están las mayores pérdidas de potencia en el motor, sino también identificar los parámetros eléctricos del motor usando algoritmos robustos de búsqueda global. La identificación de los parámetros eléctricos del motor de inducción permite simular transitorios así como también simular el comportamiento del motor a cualquier condición de carga.

4.3.4 Gestión de auditoría energética. Una auditoría energética consta de tres fases básicas:

- Fase de diagnóstico: incluye un análisis de la situación actual de la instalación, que se pretende auditar, caracterizar el tipo de empresa, su situación y entorno, los suministros energéticos y los sistemas consumidores de energía.
- Fase de desarrollo: incluye mediciones de los principales parámetros y análisis de documentación, datos y estudios de mejoras.
- Fase final: incluye la redacción del informe técnico y económico de auditoría con la situación prevista, aportando las mejoras necesarias para conseguir su optimización energética económica y medioambiental.

4.3.4.1 Tipos de auditorías energéticas. Las auditorías energéticas se pueden clasificar de acuerdo a:

A. Áreas funcionales, uso de los energéticos y/o procesos estudiados

- Áreas Funcionales: Operativas, administrativas, o subáreas de éstas (talleres, oficinas, cocinas, calderas).
- Usos: Iluminación, climatización, refrigeración, calefacción, actividades de oficina, producción de vapor, etc.
- Procesos: Empaque, secado, trillado, despulpado, entre otros.

B. Procesos generales de la empresa

- Auditorías eléctricas: Se realizan sobre equipos o sistemas que producen, convierten, transfieren, distribuyen o consumen energía eléctrica.

- Auditorías térmicas: Se realizan sobre equipos o sistemas que producen, convierten, transportan o distribuyen fluidos líquidos o gaseosos.

C. Alcance esperado

- Auditoría Preliminar (diagnóstico). Diagnóstico sensorial (visual, auditivo, al tacto) de las oportunidades de reducir consumos y costos energéticos. Diagnóstico rápido de las oportunidades de reducir consumos y costos energéticos. Su costo puede ser relativamente bajo. Generalmente se toma unas pocas horas y no requiere de ningún tipo de mediación, las recomendaciones se pueden efectuar a muy bajo costo.

- Auditoría Detallada. Evaluación detallada (con planos y pruebas técnicas) de las oportunidades de reducir consumos y costos energéticos. Requiere el uso de equipos de medida y su alcance puede abarcar la totalidad de los recursos energéticos de la empresa, o solo un tipo de recurso. Requiere un levantamiento completo de los consumos históricos de los diferentes energéticos a considerar. Su costo puede ser apreciable y su duración de varios días.

- Auditoría Especial. Evaluación más profunda a la obtenida en la Auditoria Detallada, y llegando al detalle de toma de registros por aparato, medición de otros parámetros como calentamientos en diferentes partes de la distribución del energético, inventario completo y ubicación en la vista en planta de le empresa de los equipos consumidores de energéticos, análisis de fallas durante un período determinado y su efecto en las horas hábiles de trabajo, y otros análisis que requiera la empresa auditada. Estas Auditorías Energéticas se vuelven permanentes,

durante un periodo de tiempo que puede ser de un año, y en el cual se deben efectuar los correctivos necesarios para el éxito de los cambios e inversiones efectuadas. Su costo es alto y requiere de una firma auditora que tenga todos los instrumentos requeridos para una auditoría energética sofisticada.

- Auditoría de Seguimiento. Asistencia en implantación de recomendaciones y evaluación de sus efectos.

D. Grado de profundidad del estudio (Servicio contratado)

- Diagnóstico Energético. Recopilación inicial de información, toma de datos, contabilidad energética, evaluación y análisis de datos y diagnóstico de las instalaciones.
- Asesoría Energética. Registro eléctrico general, toma de medidas representativas, análisis de los gases de combustión, etc.
- Auditoría Energética. Registros eléctricos específicos, toma de medidas específicas, inventario de equipos consumidores, estudio de viabilidad técnica-económica, plan de actuación priorizada, entre otros.

Proyectos de eficiencia energética que se pueden desarrollar en la industria. Los proyectos de eficiencia energética que se pueden desarrollar en la industria se clasifican de la siguiente manera:

- Proyectos de sustitución. Proyectos donde se cambia total o parcialmente una fuente energética por otra u otras. La viabilidad de este tipo de proyectos radica en la comparación de

las disponibilidades y los precios de las diferentes fuentes energéticas y/o en la comparación de las eficiencias de los equipos y procesos productivos asociados con cada fuente.

- Proyectos para mejora de términos económicos de suministro. Proyectos donde se mejoran las condiciones comerciales de suministro de energía que está utilizando la industria sin llevar a cabo ninguna sustitución entre las fuentes energéticas. Esto es el resultado de estructurar unos nuevos términos comerciales con unas mejores condiciones de suministro de energía. La viabilidad de este tipo de proyectos reside en el conocimiento que se tenga del mercado de los energéticos y en la capacidad negociadora.

- Proyectos de Reversión y Reingeniería. En este tipo de proyectos se encuentran aquellos que están relacionados con mejoras directas en la eficiencia de los equipos y/o procesos. Es el caso de proyectos como el cambio de motores corrientes por motores eficientes, proyectos de mejora en la transmisión de energía, programas de mejoras de aislamiento, actualización tecnológica, entre otros.

- Proyectos de Uso de residuos como fuente energética. Proyectos donde se utilizan residuos de los procesos industriales como fuente energética para inyectarlos de nuevo a proceso (ejemplo: vapor, gases calientes) o para la generación de calor y/o electricidad (residuos sólidos).

- Proyectos de Cambios de hábito – D.S.M (Demand Side Management). En este último grupo se encuentran los proyectos que buscan ahorrar energía por los beneficios que se logren de las modificaciones que se puedan realizar desde el punto de vista de la demanda. Se encuentran en este grupo proyectos, tanto los de traslado del esquema de consumo de la curva de carga (buscando adoptarse a las mejores condiciones tarifarias) como los de disminución o supresión

total de una parte del consumo en unos determinados periodos. La figura 15 muestra de forma esquemática los proyectos que se pueden desarrollar en eficiencia energética

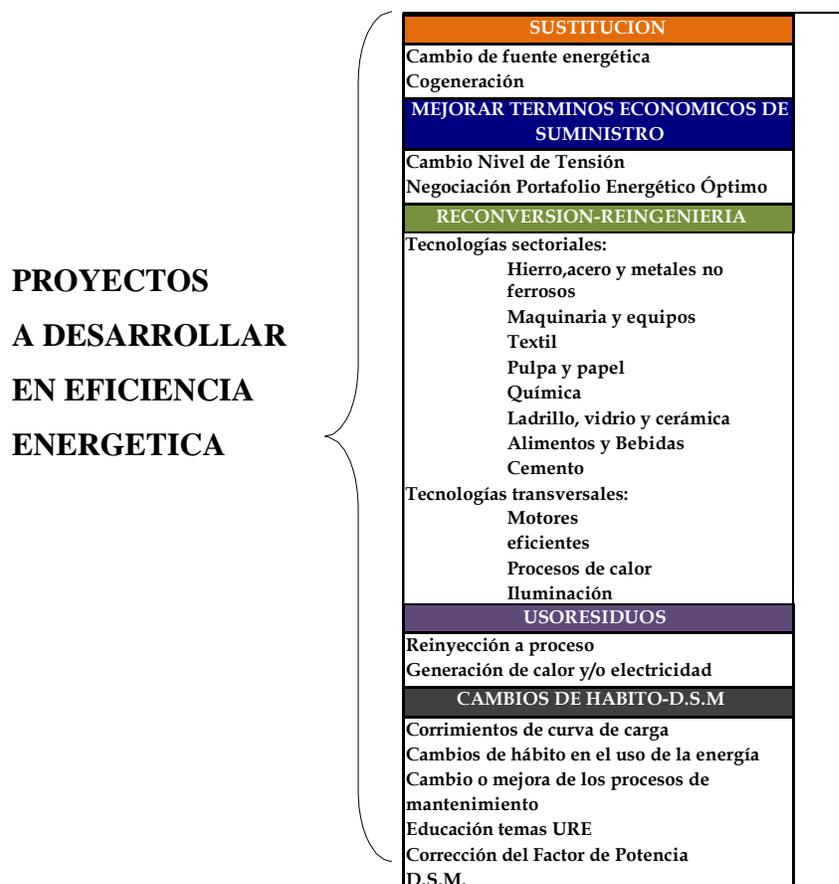


Figura 25. Clasificación de los proyectos de eficiencia energética para la industria. Fuente: URE

Componentes que integran el marco energético industrial. En la evaluación de proyectos de eficiencia energética es necesario considerar la totalidad de los costos involucrados para colocar el energético en puerta de industria. Normalmente esos costos involucran el suministro, el transporte, la distribución, la comercialización y otros costos propios del energético utilizado.

- **Fuentes Externas de Energía**

Corresponde a los energéticos más comunes con que puede contar la Industria Colombiana. De ellos, los seis primeros son generalmente usados con fines térmicos, mientras que el último, se emplea con fines eléctricos.

- Gas natural.
- Carbón
- Fuel Oil.
- Crudo de Rubiales.
- Gas Licuado del Petróleo GLP
- Diesel
- Energía eléctrica, en sus diferentes niveles de tensión.
- Estructuras de transformación energética en Planta

Generalmente, para industrias de mediano o gran tamaño que las diferentes fuentes externas de energía no vayan directamente a las máquinas y equipos de uso final en la industria. Por lo general estas fuentes externas son recibidas en equipos transformadores de energía que cambian el estado de dicha energía de la forma en que se encuentra en la fuente externa, a la forma como es útil para desarrollar el proceso productivo. Dentro de este grupo de equipos transformadores de energía, los más comunes son:

- **Calderas:** producción de vapor mediante el uso de una fuente de energía externa.
- **Transformadores eléctricos:** cambio del nivel de tensión de la energía eléctrica para que sea utilizable por los equipos de la industria.
- **Intercambiadores de Calor:** generación de Calor o Frío.
- **Cogeneración:** Aprovechamiento de la energía de un combustible para generar simultáneamente y en “sitio de planta” energía térmica y eléctrica.
- **Autogeneración:** Se aprovecha la energía de un combustible para generar en “sitio de planta” energía eléctrica.
- **Proceso Productivo**

El proceso productivo, compuesto tanto por la serie de máquinas y equipos que tenga la fábrica, como por el esquema de producción que emplee. Cualquier industria posee varios tipos de máquinas y equipos que hacen parte de los diferentes procesos productivos que se llevan a cabo en ella. Igualmente, cuenta con un esquema de producción que se define como el conjunto de hábitos a través de los cuales los procesos productivos son llevados a cabo. Por hábitos se entienden aspectos tales como los horarios y la periodicidad en que se desarrolla la producción, el orden y los métodos bajo los cuales ella se lleva a cabo, la forma en que se haga el mantenimiento de la maquinaria y el equipo, etc.

- **Requerimientos Energéticos**

El conjunto de las estructuras de transformación energética, y las diferentes máquinas y equipos sumados a los esquemas de producción de cada industria determinan los requerimientos

de los tipos de energía necesarios para que la industria desarrolle a satisfacción sus procesos productivos. Con base en ello se definen las cantidades de cada energético que se requieren para suplir las necesidades de la industria. De forma general, a excepción de industrias que utilicen algunos subproductos o residuos de su producción como fuente de energía, estos energéticos son obtenidos a través de fuentes externas de suministro.

Se indica que esta determinación de los energéticos corresponde a un “plazo inmediato”, pues es fundamental entender que la definición de las fuentes de energía y la de las estructuras de transformación energética, equipos y esquemas de producción es algo totalmente interactivo y dinámico. Es decir, que se debe tener claro que lo segundo no determina en el mediano y largo plazo lo primero, sino que se trata de un proceso donde se requiere una permanente evaluación del Costo-Beneficio de todos y cada uno de los cuatro componentes anteriores: Fuentes de Energía, Estructuras de transformación, Equipos y Maquinaria y Esquemas de Producción.

La figura 26 muestra una definición del esquema energético para la industria, en el cual se observa la estructura y la relación que guardan entre si cada uno de sus componentes.

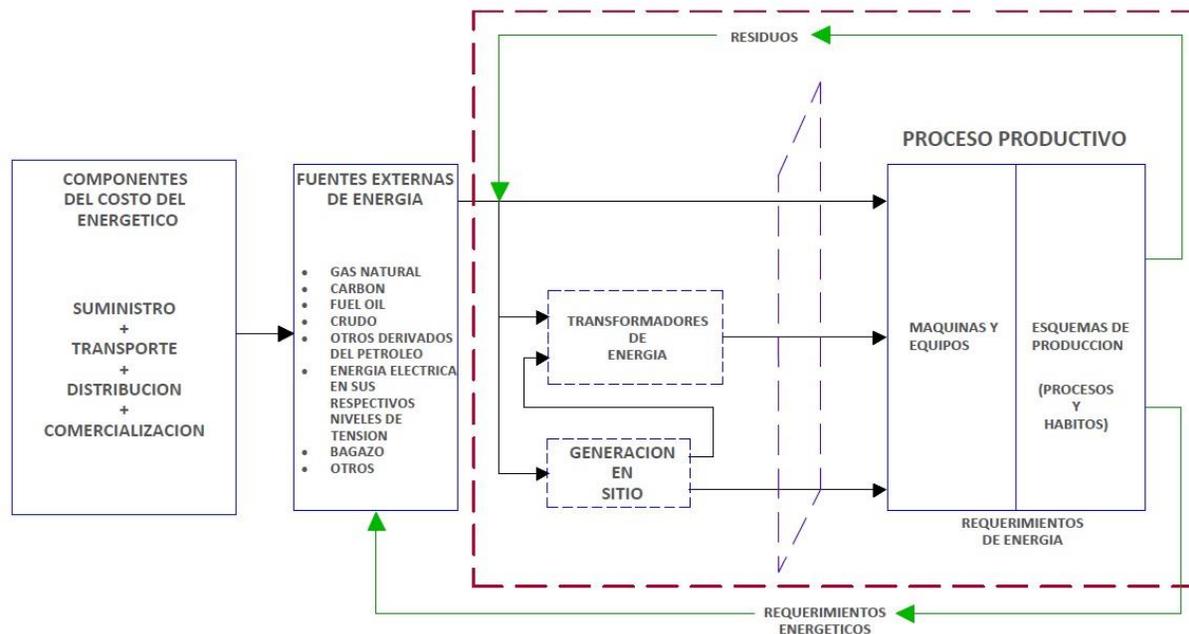


Figura 26. Definición del esquema energético para la industria. Fuente: Lawrie, 2002.

4.3.5 Avances del reglamento técnico de etiquetado RETIQ. Según el Ministerio de Minas y Energía (2015) en el Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ, los equipos de uso final de energía y gas combustible que se comercialicen en el territorio de la República de Colombia, incluidos en el alcance del presente reglamento, deberán cumplir como mínimo con los siguientes requisitos técnicos:

Objetivos de la etiqueta URE:

La etiqueta URE tiene como objetivos:

- Brindar a los consumidores información útil relacionada con el desempeño energético de los equipos de uso final de energía que pretende adquirir.
- Impulsar utilización de tecnología eficiente en el país por medio de la normalización de equipos.

- Orientar la preferencia de los usuarios hacia equipos de mejor desempeño energético.
- Incrementar la demanda de equipos eficientes en el mercado de equipos de uso final de energía.

Para el cumplimiento de los anteriores objetivos todos los equipos puestos a disposición de los consumidores y usuarios deberán:

- Incorporar, llevar consigo o presentar visualmente, de forma cierta y objetiva, la información eficaz comprobable, veraz y suficiente sobre sus características esenciales.
- No dejar lugar a dudas respecto de la verdadera naturaleza del equipo.
- No inducir a error o engaño por medio de inscripciones, signos, anagramas o dibujos.
- No omitir o falsear datos de modo que con ello pueda inducirse a error o engaño al consumidor o propiciar una falsa imagen del equipo.
- No contener indicaciones, sugerencias o formas de presentación que puedan suponer confusión con otros equipos.

Muestra de la etiqueta que debe llevar:

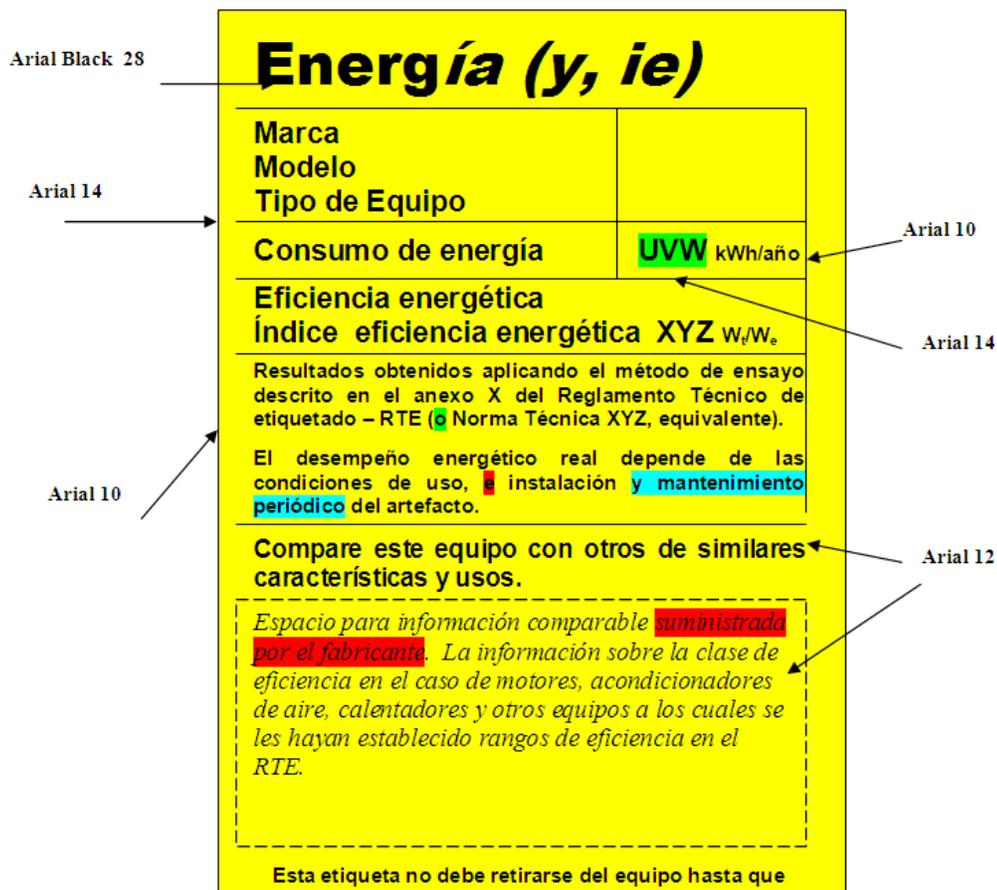


Figura 27. Muestra de la etiqueta que debe llevar. Fuente: Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ, 2015

Ejemplo de dimensiones, distribución y tipos de letra a usar de una etiqueta tamaño A6.

Marcaciones: La etiqueta debe marcarse de forma legible y contener mínimo la siguiente información, como se ilustra en la figura:

- Una leyenda que diga “ENERGÍA” o en su defecto el texto “ENERG” adicionado con una, o un arreglo compuesto por las siguientes letras “y”, “ía” o “ie”.

b. Una leyenda que diga “**Marca**” y en frente el espacio para especificar la marca o marcas registradas o nombre del fabricante.

c. Una leyenda que diga “**Modelo**” y en frente el espacio para especificar el modelo del equipo.

d. Una leyenda que diga “**Tipo de Equipo**” y en frente el espacio para especificar a cuál corresponde, por ejemplo: motor trifásico, refrigerador, congelador o una combinación de estos, etc.

e. Una leyenda que diga “**Consumo de energía**” precediendo un espacio donde se consignará el valor correspondiente al consumo de energía o gas combustible certificado en kWh/año o kWh/h a declarar. El valor deberá determinarse bajo condiciones nominales de ensayo, según se especifique para cada producto en el presente reglamento.

f. Una leyenda que diga “**Eficiencia energética**”.

g. Una leyenda que contenga el nombre de la variable o tipo de eficiencia declarada para cada tipo de equipo según se establece en el presente reglamento. Por ejemplo para el caso de acondicionadores de aire “**Eficiencia térmica**”, para motores eléctricos “**Eficiencia**”, etc.

h. Espacio para consignar el **valor** determinado mediante ensayo de la **variable declarada** para el desempeño energético y las unidades en que está medido, según el tipo de equipo, por ejemplo: **kWh/año, Wt / We, %, etc.**

i. Una nota con el siguiente texto: “Resultados obtenidos aplicando el método de ensayo descrito en el anexo X del Reglamento Técnico de Etiquetado (O norma técnica XYZ,

equivalente). . . ”. Especificar: *el Anexo del presente Reglamento Técnico o la Norma Técnica Internacional o de reconocimiento internacional equivalente usada, según el tipo de equipo.*

j. Una leyenda que diga “El desempeño energético real depende de las condiciones de uso, e instalación y mantenimiento periódico del artefacto.”

k. Una leyenda que diga:”Compare este equipo con otros de similares características y usos.”

l. Espacio reservado para información comparable establecida para cada tipo de equipo por el presente reglamento suministrada por el fabricante. La información de características generales especificadas en los requisitos particulares de cada tipo de equipo, para efectos comparativos por parte de los consumidores. Por ejemplo: vida útil, pérdidas, volumen útil, etc.

En el caso de motores eléctricos trifásicos, acondicionadores de aire, y los demás cuando se establezcan rangos de desempeño, se consignará la información relativa al rango o clase de eficiencia del equipo, según lo dispuesto en el numeral 6.3.2.1.

m. Una leyenda que diga “Esta etiqueta no debe retirarse del equipo hasta que haya sido adquirido por el consumidor final”.

Los textos e informaciones de los literales b., c., d. e i. deben ser incluidos en la etiqueta a menos que estén claramente especificados y marcados en el empaque o el equipo.

La información de los literales “b” marca, “c” modelo y “d” tipo de producto podrán omitirse si se encuentran fácilmente visibles y legibles en otra parte del empaque.

Rangos de etiquetado:

La etiqueta en el espacio dispuesto para información comparativa contendrá la siguiente información para equipos a los que se establezcan rangos de eficiencia en el presente reglamento.

- a. Una leyenda en la parte superior del rango A que diga “Más eficiente” y una leyenda en la parte inferior de la barra del último rango que diga “Menos eficiente” o texto similar de acuerdo con el parámetro a declarar, por ejemplo “Menor consumo”, “Mayor eficacia”, etc.
- b. La ilustración mediante barras de colores de los “Rangos” usados para la clasificación de los equipos de acuerdo con su desempeño energético, deberá contemplar las especificaciones de la figura siguiente para el tamaño A6 y guardar proporción para los tamaños inferiores. (dimensiones en milímetros).

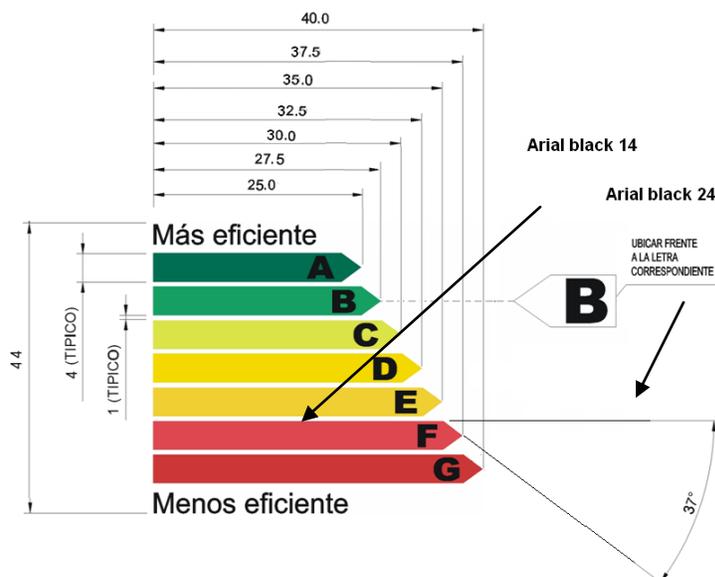


Figura 28. Especificaciones para la ilustración de rangos de eficiencia con barras de colores en tamaño de etiqueta A6. Fuente: Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ, 2015

c. Una flecha que indique el rango al que pertenece el equipo de acuerdo con su desempeño energético, determinado mediante el método de ensayo indicado en el literal i del numeral 6.3.2. Dentro de la flecha debe ir la letra correspondiente al rango que está señalando.

Color de la etiqueta. La etiqueta debe ser en color amarillo (Panton 108U) con letras negras. En los casos de excepción podrá ser en fondo de color blanco con letras en negro.

Deben emplearse los siguientes colores para cada una de las barras que identifican los rangos de desempeño:

Tabla 2. Colores normalizados para identificación de rangos de etiquetado

Barra	Color, Panton
A	3415U
B	347U
C	387U
D	108U
E	129U
F	1787U
G	1797U

Fuente: Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ, 2015

Rangos para etiquetado. El reglamento en el capítulo 3 especifica para la variable a declarar (X) y los rangos normalizados de desempeño energético nombrados desde el A++ ó A hasta el rango que se determina para cada equipo en el presente reglamento. Para cada rango se indican sus valores límites (I, II, III, IV, V, VI y VII), como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 3. Rangos de etiquetado

Rango	Rangos de desempeño energético
A++	$x > l$
A +	$II < x \leq I$
A	$III < x \leq II$
B	$IV < x \leq III$
C	$V < x \leq IV$
D	$VI < x \leq V$
E	$VII < x \leq VI$
F	$VIII < x \leq VII$
G	$IX < x \leq VIII$

Nota: Los números romanos del *I* a *IX* ejemplarizan los valores límites de los rangos, el comienzo de un rango es donde termina el inmediatamente anterior.

Fuente: Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ, 2015

Designación de rangos para etiquetado de desempeño energético.

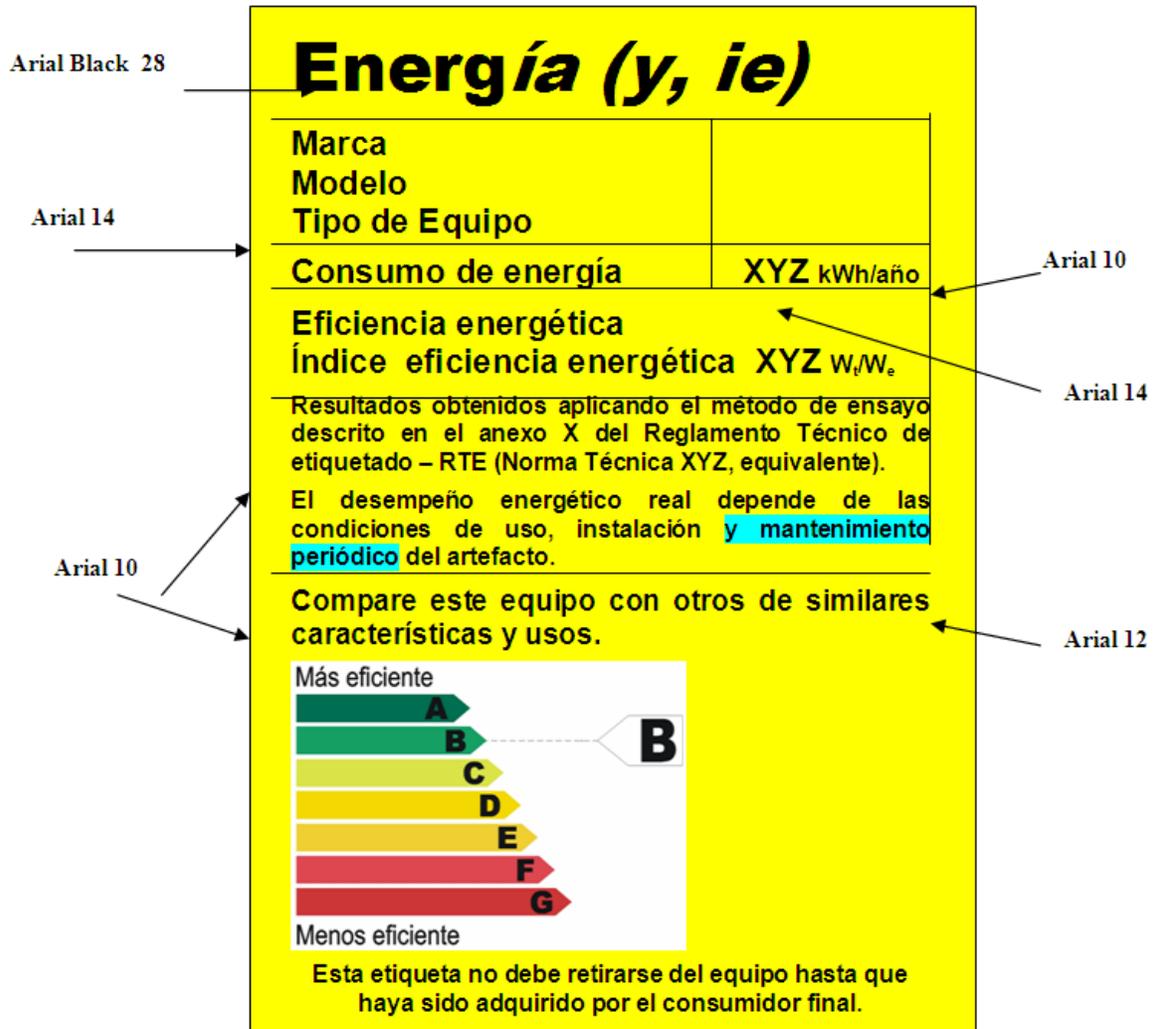


Figura 29. Ejemplo de dimensiones, distribución y tipos de letra a usar de una etiqueta tamaño A6. Fuente: Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ, 2015

Ejemplo de etiqueta para motores trifásicos:

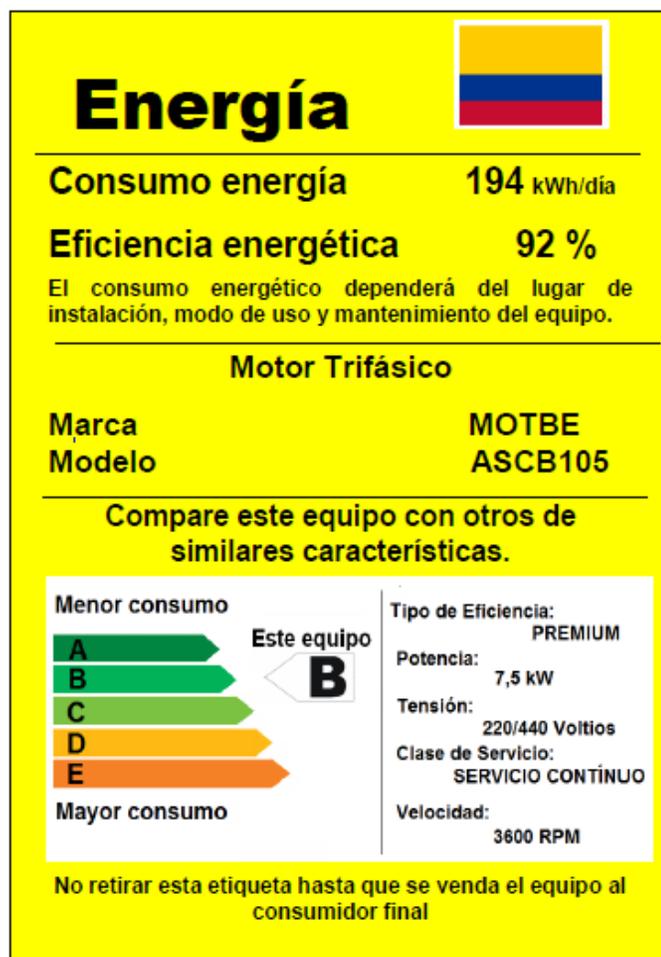


Figura 30. Ejemplo de etiqueta para motores trifásicos. Fuente: Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ, 2015

Según el artículo 12 del Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ sobre motores trifásicos, se establece como parámetro de etiquetado para motores eléctricos trifásicos la eficiencia, expresada en % definida como la potencia mecánica de salida (medida en el eje) sobre la potencia eléctrica de entrada. Para el efecto se establecen los valores de eficiencia nominal, los rangos para etiquetado, el método de prueba para su evaluación, y los requisitos mínimos de muestreo y aceptación.

La eficiencia debe ser determinada a la potencia nominal P_N , tensión nominal U_N y frecuencia nominal f_N .

Los motores eléctricos de corriente alterna, trifásicos objeto del presente reglamento corresponden con motores de inducción, jaula de ardilla, con potencias nominales desde 0,746 kW hasta 373 kW, voltaje nominal de hasta 600 V, de una sola frecuencia de rotación, abiertos y cerrados; con posición de montaje horizontal o vertical, que se importen o fabrique para comercializar en el territorio nacional.

Clasificación por tipo de encerramiento. Los motores trifásicos sujetos a lo dispuesto en el presente reglamento se clasifican por su tipo de encerramiento, así:

a) Motor abierto

b) Motor cerrado

Eficiencia del motor. Cualquier motor trifásico objeto del presente reglamento debe tener indicada en su placa de datos una eficiencia nominal igual o mayor a la especificada en las tablas 12.1.1 A, 12.1.1 B, 12.1.1 C y 12.1.1 D. Los motores que tengan eficiencia menor a la establecida en la tabla 12.1.1 D se deberán etiquetar como de **baja eficiencia**. En ningún caso se podrán comercializar motores con eficiencia inferior a 60%, límite que podrá modificar el Ministerio de Minas y Energía de acuerdo con la evolución del mercado.

Para potencias nominales de motor cuyos valores no estén determinados en las tablas, se debe tomar el valor de la eficiencia límite como sigue:

- Si la potencia corresponde con el punto medio o superior a dos potencias consecutivas, se debe tomar el valor de eficiencia correspondiente a la potencia mayor.
- Si la potencia está por debajo del punto medio entre dos potencias consecutivas, se debe tomar el valor de eficiencia correspondiente a la potencia menor.

Tabla 4. Límite inferior nominal para Eficiencia Super Premium (IE4) (%) 60Hz

PN kW	Número de polos		
	2	4	6
0,75	86,0	89,5	88,0
1,1	87,2	90,7	95,2
1,5	88,0	89,0	95,5
2,2	89,5	93,2	96,2
3,7	90,8	91,8	92,8
5,5	91,5	94,1	94,5
7,5	91,8	93,8	93,8
11	93,1	94,5	93,0
15	92,4	94,7	92,7
18	92,9	95,3	94,4
22	92,9	94,9	93,9
30	93,6	95,3	95,3
37	93,8	95,4	95,3
45	94,7	95,9	96,1
55	94,2	96,6	95,8
75	94,7	96,6	96,0
90	96,2	96,6	96,0
110	96,2	97,1	96,7
150	96,1	96,9	96,7
185 hasta 375	96,8	97,1	96,7

Fuente: Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ, 2015

Tabla 5. Límite inferior nominal para Eficiencia Premium (IE3) (%) 60Hz

Potencia nominal		Número de polos		
HP	kW	2	4	6
1,0	0,75	83,0	85,5	82,5
1,5	1,1	84,0	86,5	87,5
2,0	1,5	85,5	86,5	88,5
3,0	2,2	86,5	89,5	89,5
5,0	3,7	88,5	89,5	89,5
7,5	5,5	89,5	91,7	91,0
10,0	7,5	90,2	91,7	91,0
15,0	11	91,0	92,4	91,7
20,0	15	91,0	93,0	91,7
25,0	18,5	91,7	93,6	93,0
30,0	22	91,7	93,6	93,0
40,0	30	92,4	94,1	94,1
50,0	37	93,0	94,5	94,1
60,0	45	93,6	95,0	94,5
75,0	55	93,6	95,4	94,5
100,0	75	94,1	95,4	95,0
125,0	90	95,0	95,4	95,0
150,0	110	95,0	95,8	95,8
200,0	150	95,4	96,2	95,8
250 hasta 500	185 hasta 375	95,8	96,2	95,8

Fuente: Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ, 2015

Tabla 6. Límite inferior nominal para Eficiencia Alta (IE2) (%) 60Hz

Potencia nominal		Número de polos		
HP	kW	2	4	6
1,0	0,75	81	82,5	80,0
1,5	1,1	82,5	84,0	85,5
2,0	1,5	84,0	84,0	86,5
3,0	2,2	85,5	87,5	87,5
5,0	3,7	87,5	87,5	87,5
7,5	5,5	88,5	89,5	89,5
10,0	7,5	89,5	89,5	89,5
15,0	11	90,2	91,0	90,2
20,0	15	90,2	91,0	90,2
25,0	18,5	91,0	92,4	91,7
30,0	22	91,0	92,4	91,7
40,0	30	91,7	93,0	93,0
50,0	37	92,4	93,0	93,0
60,0	45	93,0	93,6	93,6
75,0	55	93,0	94,1	93,6
100,0	75	93,6	94,5	94,1
125,0	90	94,5	94,5	94,1
150,0	110	94,5	95,0	95,0
200,0	150	95,0	95,0	95,0
250 hasta 500	185 hasta 375	95,4	95,4**	95,0

** El límite nominal de eficiencia energética en norma NEMA es 95,0 % para 185 kW y 95,8 % para 375 kW

Fuente: Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ, 2015

Tabla 7. Límite inferior nominal para Eficiencia Estándar (IE1) (%) 60Hz

Potencia nominal		Número de polos		
HP	kW	2	4	6
1,0	0,75	77,0	78,0	73,0
1,5	1,1	78,5	79,0	75,0
2,0	1,5	81,0	81,5	77,0
3,0	2,2	81,5	83,0	78,5
5,0	3,7	84,5	85,0	83,5
7,5	5,5	86,0	87,0	85,0
10,0	7,5	87,5	87,5	86,0
15,0	11	87,5	88,5	89,0
20,0	15	88,5	89,5	89,5
25,0	18,5	89,5	90,5	90,2
30,0	22	89,5	91,0	91,0
40,0	30	90,2	91,7	91,7
50,0	37	91,5	92,4	91,7
60,0	45	91,7	93,0	91,7
75,0	55	92,4	93,0	92,1
100,0	75	93,0	93,2	93,0
125,0	90	93,0	93,2	93,0
150,0	110	93,0	93,5	94,1
200,0	150	94,1	94,5	94,1
250 hasta 500	185 hasta 375	94,1	94,5	94,1

Fuente: Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ, 2015

Rangos para etiquetado. De acuerdo con la potencia del motor evaluado, su tensión de servicio y los resultados del ensayo indicado en el numeral 12.3., los motores se deben clasificar en un rango de acuerdo con la siguiente tabla.

Tabla 8. Rangos de eficiencia energética para motores trifásicos

RANGO	Límite inferior Eficiencia nominal (incluido)	Límite superior Eficiencia nominal (no incluido)	Designación clase de eficiencia
A	Valores de tabla 12.1.1 A	100%	Eficiencia Super Premium
B	Valores de tabla 12.1.1 B	Valores de tabla 12.1.1A	Eficiencia Premium (IE3)
C	Valores de tabla 12.1.1 C	Valores de tabla 12.1.1B	Eficiencia Alta (IE2)
D	Valores de tabla 12.1.1 D	Valores de tabla 12.1.1C	Eficiencia estándar(IE1)
E	60%	Valores de tabla 12.1.1D	Baja eficiencia

Fuente: Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ, 2015

Método de ensayo. Para determinar la eficiencia energética de motores de inducción trifásicos objeto del presente reglamento, en potencia nominal de 0,746 a 373 kW, se establece como método de ensayo el descrito en el Anexo E del presente reglamento, adaptado de las normas NTC 3477 e IEC 60034-2-1, 2007 “ *Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*”. Podrá usarse un ensayo equivalente establecido en norma internacional o de reconocimiento internacional.

Muestreo. Para una misma referencia se selecciona una muestra, la cual se evalúa de acuerdo con lo establecido en el presente reglamento. Se aceptarán las tolerancias indicadas en la tabla del

presente reglamento (**Tolerancias en los valores de las cantidades**), adaptadas de las normas NTC 2805 e IEC 60034-1.

Selección de la muestra:

Se requiere aplicar el siguiente plan de muestreo a cada referencia de motor:

- Se toma una muestra de tres motores de la producción, o representativa de la producción del modelo que requiera probarse.
- Para el caso de motores de importación la muestra debe ser de tres artefactos o representativa de la importación que requiera probarse.
- Para lotes de menos de tres motores se evalúa una muestra la cual debe cumplir con los valores estipulados, en caso contrario no se acepta el valor declarado.

Tabla 9. Tolerancias en los valores de las cantidades

Ítem	Magnitud	Tolerancia
1	Eficiencia η - Máquinas de potencia inferior o igual a 150 kW (o kVA) - Máquinas de potencia superior a 150 kW (ó kVA)	- 15 % de $(1 - \eta)$ - 10 % de $(1 - \eta)$
2	Pérdidas totales (aplicables a máquinas con regímenes nominales > 150 kW o kVA)	+ 10 % de las pérdidas totales
3	Factor de potencia, $\cos \phi$, para máquinas de inducción	-1/6 de $(1 - \cos \phi)$ Valor mínimo absoluto 0,02 Valor máximo absoluto 0,07
4 a)	Deslizamiento de los motores de inducción (a carga plena y a la temperatura de funcionamiento) $P_N < 1 \text{ kW}$ $P_N \geq 1 \text{ kW}$	$\pm 30 \%$ del deslizamiento $\pm 20 \%$ del deslizamiento.
4 b)	Velocidad de los motores de corriente alterna con colector en derivación (a carga plena y a la temperatura de funcionamiento).	-Sobre la velocidad más alta: 3 % de la velocidad sincrónica -Sobre la velocidad más baja: + 3 % de la velocidad sincrónica
5	Corriente de rotor bloqueado de los motores de inducción tipo jaula de ardilla, con cualquier dispositivo de arranque especificado.	+ 20 % de la corriente de arranque
6	Torque de rotor bloqueado de los motores de inducción tipo jaula de ardilla	+ 25 % - 15% del torque especificado (mediante acuerdo se puede sobrepasar la cifra de + 25 %).
7	Torque mínimo durante el arranque de los motores de inducción	- 15 % del torque especificado.
8	Torque máximo durante el arranque de los motores de inducción	-10 % del torque, especificado excepto que después de la aplicación de esta tolerancia, el torque no debe ser inferior a 1,6 ó 1,5 veces el torque nominal.
9	Momento de inercia	$\pm 10 \%$ del valor

Nota: Cuando se especifica una tolerancia solamente en un sentido, el valor no está limitado en el otro sentido.

Criterios de aceptación. El valor obtenido en el ensayo de eficiencia nominal debe estar dentro de los límites establecidos en la tabla para la clase de eficiencia declarada, en cuyo caso el valor dado por el fabricante para la eficiencia es aceptado; en caso contrario se toman dos muestras adicionales las cuales deben cumplir con los valores estipulados, si al menos una de las muestras no cumple con dichos valores no se acepta el valor declarado.

Rotulado. Adicional a la etiqueta de eficiencia, el motor debe contener la placa de rotulado que establece el RETIE.

Marco Legal:

Ley 697 de 2001. Ley promulgada por el congreso que declaró el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, fundamental para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías no convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales.

Decreto 3683 de 2003. Decreto que tiene como objetivo reglamentar el uso racional y eficiente de la energía, de tal manera que se tenga la mayor eficiencia energética para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad del mercado energético colombiano, la protección al consumidor y la promoción de fuentes no convencionales de energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables.

Adicionalmente la resolución 18609 de 2006 define los programas que hacen parte del Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás formas de energía no

convencionales. El decreto 2501 de 2007 dicta disposiciones para promover practicas con fines de uso racional y eficiente de energía, define algunos programas prioritarios y estrategias del PROURE.

El decreto 2688 de 2008 modifica la integración de la comisión intersectorial y reglamente la condecoración al uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales. El Decreto 3450 de 2008 por el cual se dictan medidas tendientes al uso racional y eficiente de la energía eléctrica, cuyo objetivo y campo de aplicación determina la sustitución de las fuentes de iluminación de baja eficacia lumínica, utilizando las fuentes de iluminación de mayor eficacia lumínica disponibles en el mercado.

Que el 3 de octubre de 2001 el Congreso de la República expidió la Ley 697 mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones, la cual en su artículo primero declara el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE), como asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, fundamental para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías no convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales.

Que la dependencia y el aumento progresivo del consumo de la electricidad y el gas combustible en la vida actual obligan al estado a establecer unas exigencias y especificaciones que propendan por el uso racional de la energía eléctrica y el gas combustible.

Que se requiere expedir un Reglamento Técnico aplicable a algunos equipos de uso final de la energía eléctrica y gas combustible , con el propósito de: (i) Establecer los requisitos de

presentación y contenido de la etiqueta, así como los valores mínimos de eficiencia, o valores máximos y rangos de los consumos de energía eléctrica y gas combustible en tales equipos, como medio de protección a los intereses de información de los consumidores de estos equipos; (ii) Determinar los requisitos y ensayos que los equipos sujetos a este Reglamento Técnico deben cumplir; (iii) Especificar el procedimiento de evaluación de la conformidad que facilite la comercialización de los equipos sujetos a Reglamento Técnico; (iv) Establecer las condiciones de cumplimiento especiales para equipos facturados, despachados y en inventario, antes de la fecha de entrada en vigencia del presente Reglamento Técnico; (v) Identificar las actividades de control y vigilancia.

Que el Proyecto de Reglamento Técnico aplicable a los equipos de uso final de la energía eléctrica y gas combustible fue notificado internacionalmente a los países con los cuales Colombia ha suscrito Acuerdos así:

Ante la Organización Mundial de Comercio – OMC. GTBT/N/COL/143 el 11 de febrero de 2010.

5. Metodología de Actividades

Para llevar a cabo las investigaciones que condujeran al cumplimiento de los objetivos planteados a éste trabajo se estableció los siguientes puntos de partida:

Realizar una revisión del estado del arte de los procedimientos, normas y métodos de obtener los parámetros de las máquinas eléctricas.

Revisar el estado del arte de la sensórica e instrumentación de los sistemas electromecánicos.

Revisar el estado del arte de los sistemas de adquisición de datos.

Seleccionar la arquitectura de hardware más adecuada para la aplicación.

Desarrollar la estación experimental para realizar las pruebas a las máquinas eléctricas.

Efectuar e acople de la estación de frenado para los motores de prueba.

Instalar el software de adquisición de los datos.

Utilizar el software para el tratamiento y visualización de los resultados. (Matlab).

Poner a punto la estación experimental para realizar las pruebas a las máquinas eléctricas.

Realizar varios experimentos con diferentes máquinas.

Validar los modelos de las máquinas eléctricas de los parámetros obtenidos en la estación de pruebas con los equipos de medida de operador de red.

Emitir las conclusiones y recomendaciones.

6. Resultados

6.1 Diseño y Desarrollo de la Estación Experimental

Conforme a los fundamentos teóricos y la metodología planteada, se presenta el diseño y desarrollo de la estación experimental para realizar las pruebas a las máquinas eléctricas. Para tal fin, se requirió de la adquisición e instalación de un software en los computadores seleccionados para el tratamiento de la información.

A continuación se muestra el proceso de implementación de la estación de pruebas para máquinas eléctricas.

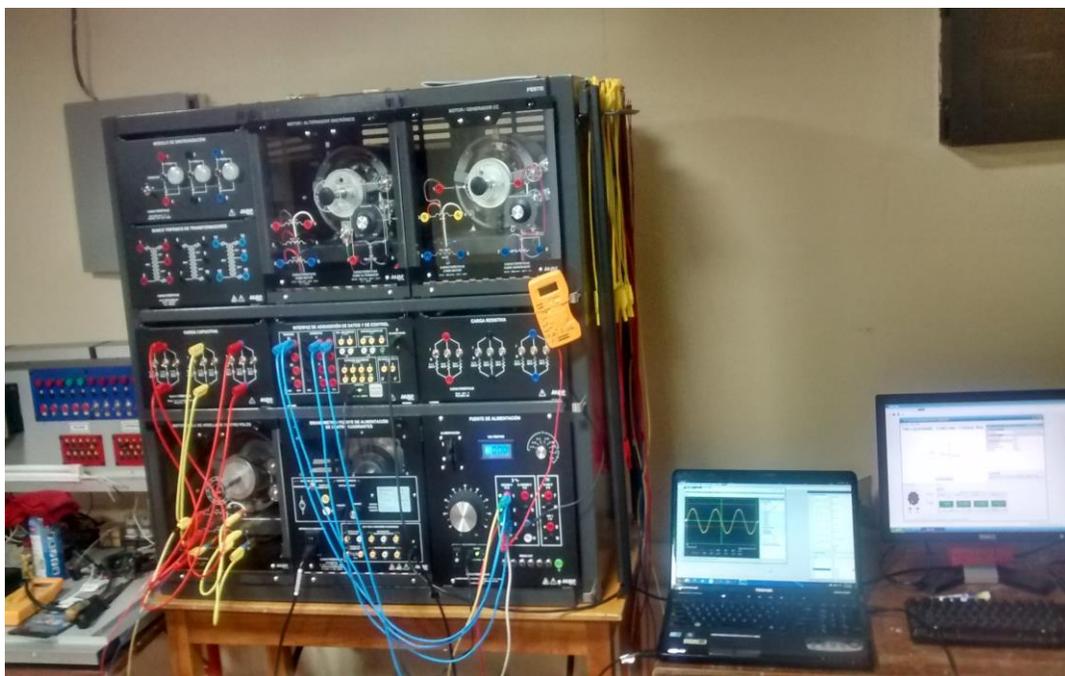


Figura 31. Estación de pruebas para máquinas eléctricas. Fuente: El Autor

La adquisición de las señales se realizará mediante los canales de entrada del sistema de adquisición de datos, configurados en los computadores con el software para mostrar en el

osciloscopio virtual como en las señales de tensión, corriente, potencia, factor de potencia, frecuencia velocidad etc. Sólo se seleccionan las opciones del programa de adquisición que se requieran determinar para la prueba y se compara con un medidor de energía del operador de red. El muestreo se realizó en los canales requeridos al mismo tiempo, este recurso de adquisición multicanal crea un fichero que guarda los valores tomados como base para el análisis.



Figura 32. Sistema de adquisición de datos. Fuente: El Autor

El análisis de los diferentes regímenes dinámicos de las máquinas y la influencia en ellos de distintos parámetros mecánicos y eléctricos como por ejemplo, la tensión, resistencia, inductancia, par giratorio, etc., fue necesario para la elección adecuada de los procedimientos de control, (por ejemplo; los variadores de velocidad), y de cálculo de los circuitos, la magnitud del consumo de energía durante el arranque y el frenado del motor.

La máquina soporta sin deterioro los procesos transitorios esperados hasta 5 Hp.



Figura 33. Proceso de adquisición de datos. Fuente: El Autor

En este trabajo se abordó el diseño e implementación de una estación de pruebas de máquinas eléctricas, que en primera instancia determinó sus parámetros y también monitoreó su funcionamiento.

El desarrollo de este trabajo se considera de importancia por las siguientes razones: es una estación de trabajo que se puede utilizar en la docencia de pregrado y posgrado (por lo que consolida la docencia). Adicionalmente, una vez conseguido los parámetros de las máquinas eléctricas sujetas a estudio se profundizará en el modelado, la simulación y adquisición de datos, para el análisis de los procesos transitorios, el balance energético y el diagnóstico y detección de fallas de las máquinas eléctricas.

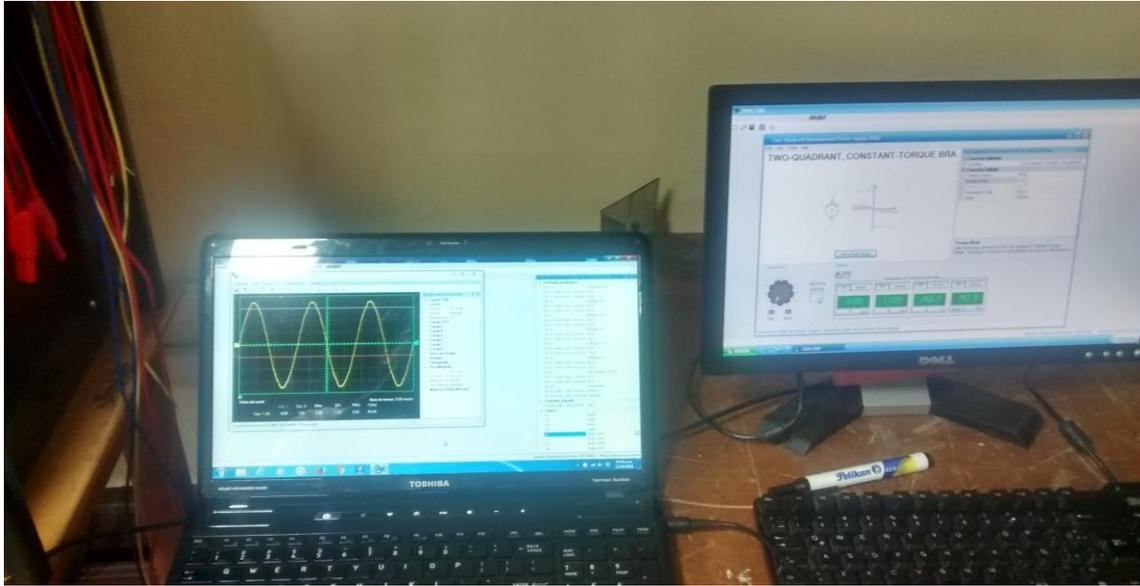


Figura 34. Imágenes del osciloscopio virtual y el par motor. Fuente: El Autor

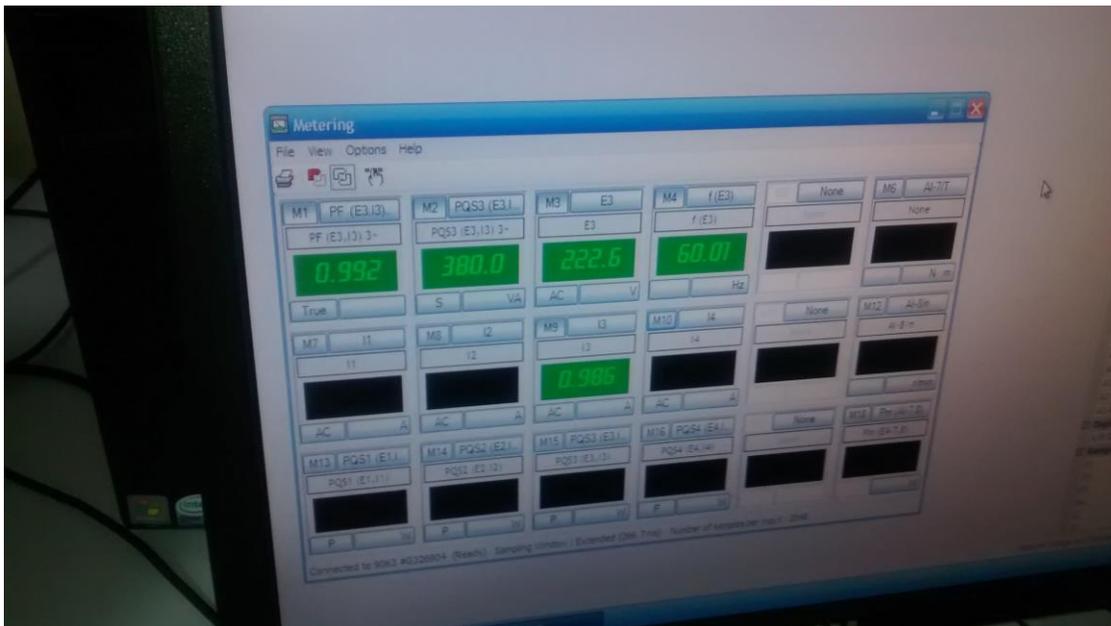


Figura 35. Imágenes de los parámetros eléctricos del motor analizado. Fuente: El Autor



Figura 36. Imágenes del medidor de energía del O.R. Muestra los Kva del motor analizado.

Fuente: El Autor



Figura 37. Imágenes de los Kvar del motor analizado. Fuente: El Autor

6.2 Parámetros de las Máquinas Eléctricas

Se determinaron los datos para conocer los parámetros de las máquinas eléctricas sujetas a estudio. Se analizó el medidor de energía trifásico digital y computadores con el software Lab-Volt de Festo para un motor jaula de ardilla cuatro polos trifásico 375 W 1670 r/min 208 V 60 Hz 1.2 A.

Tabla 10. Valores tomados sin corregir el factor de potencia

MEDIDA	FACTOR DE POTENCIA	TORQUE (N. m)	POTENCIA ACTIVA (KW)	POTENCIA REACTIVA (KVAR)	POTENCIA APARENTE KVA
1	0,333	0,000	0,090	0,262	0,278
2	0,344	0,250	0,091	0,266	0,281
3	0,497	0,500	0,142	0,268	0,302
4	0,622	0,750	0,197	0,269	0,333
5	0,708	1,000	0,253	0,274	0,374
6	0,767	1,250	0,312	0,280	0,420
7	0,809	1,500	0,376	0,290	0,475
8	0,842	1,750	0,445	0,301	0,538
9	0,864	2,000	0,520	0,318	0,609

En la siguiente tabla se muestran los datos tomados del medidor de energía trifásico digital para un motor jaula de ardilla cuatro polos trifásico 375 W 1670 r/min 208 V 60 Hz 1.2 a con un banco de capacitores de 4 μ F.

Tabla 11. Valores tomados con el factor de potencia corregido por un banco de capacitores de 4 μ F

MEDIDA	FACTOR DE POTENCIA	TORQUE (N. m)	POTENCIA ACTIVA (KW)	POTENCIA REACTIVA (KVAR)	POTENCIA APARENTE KVA
1	0,954	0,000	0,088	0,03	0,093
2	0,946	0,250	0,088	0,035	0,095
3	0,981	0,500	0,139	0,03	0,142
4	0,99	0,750	0,192	0,031	0,195
5	0,993	1,000	0,249	0,035	0,252
6	0,994	1,250	0,31	0,042	0,312
7	0,994	1,500	0,372	0,05	0,376
8	0,093	1,750	0,44	0,063	0,444
9	0,091	2,000	0,513	0,081	0,92

Se comprobaron los valores existentes en las tablas 9 y 10 que la potencia activa permanece constante con capacitores y sin capacitares. Matemáticamente los resultados de la tabla 9 y 10 se verificaron aplicando la siguiente ecuación:

Potencia activa absorbida en Kw, cuando el motor de inducción eléctrico trifásico está en funcionamiento, y el estator se alimenta de la red:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos\theta \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde

P_1 : Potencia eléctrica trifásica activa consumida de la red en K_w

V_1 : Tensión de entrada de la red en voltios V

I_1 : Intensidad de corriente consumida por el motor en amperios A

$\cos \phi$: Factor de potencia en el motor

Correspondencia de la ecuación matemática con los resultados de la investigación en el laboratorio.

Relación del factor de potencia con la potencia activa.

En la medida que el $\cos \phi$ aumenta, la intensidad de corriente I_1 disminuye, según lo observado en el medidor y los computadores y aplicado en la ecuación 1. Por lo tanto la potencia activa P_1 permanece prácticamente constante.

Así mismo, se observó de los datos registrados en las tablas 9 y 10 que si se aumenta la carga (el par), el factor de potencia se mejora.

Como se utilizó un banco de capacitores, en la tabla 10 se observó que en los datos 8 y 9 el sistema se vuelve capacitivo. No se tendrán en cuenta para la selección de la categoría del motor.

Se determinó que los motores se deben trabajar a plena carga con su compensación de factor de potencia con capacitores para una mayor eficiencia de la máquina.

Anteriormente, no se necesitaba instalar capacitores para mejorar el factor de potencia porque había disminuido su producción y debido a esto, antes los motores los trabajaban a plena carga y ahora está a media carga.

Al tomar un banco de capacitores fijo de $4 \mu\text{F}$ en la medida 8 y 9, el factor de potencia se afecta; se vuelve capacitivo, afectando igualmente de forma apreciable el consumo de potencia.

Un banco de capacitores fijo genera un momento en que produce el efecto contrario, se vuelve capacitivo.

Resultados:

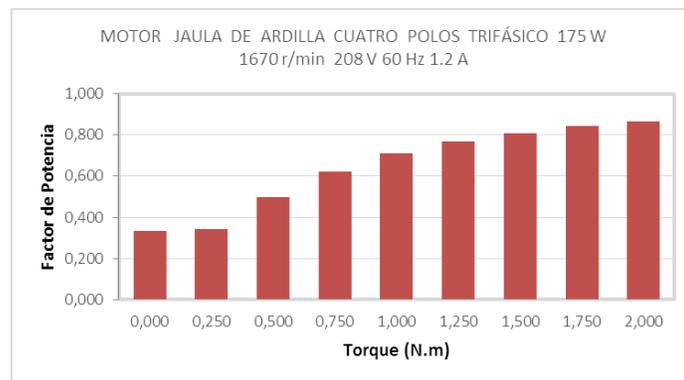


Figura 38. Resultados factor de potencia sin capacitores. Fuente: El Autor

Se comprueba que sin colocar capacitores el factor de potencia se mejora con el aumento de la carga (par).

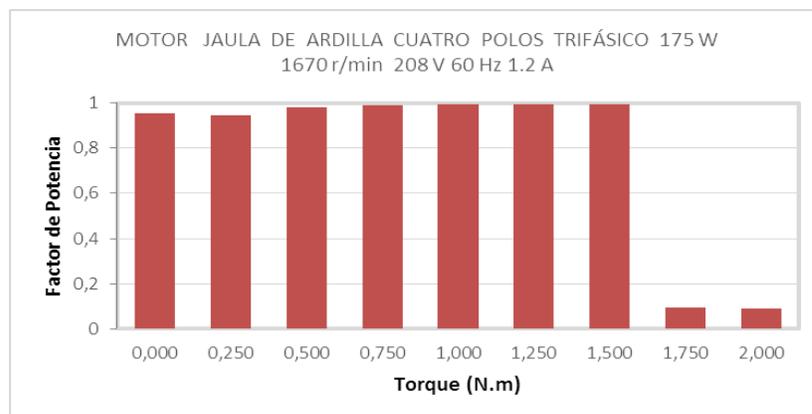


Figura 39. Resultados factor de potencia con capacitores fijos de $4 \mu\text{F}$. Fuente: El Autor

El factor de potencia se mantuvo por arriba del valor exigido cayéndose y volviéndose capacitivo en torques mayores de 1.5 Nm.. De todas maneras, el par nominal del motor es 1.5 Nm, valores mayores producen sobrecarga en el motor, luego no se tienen en cuenta.

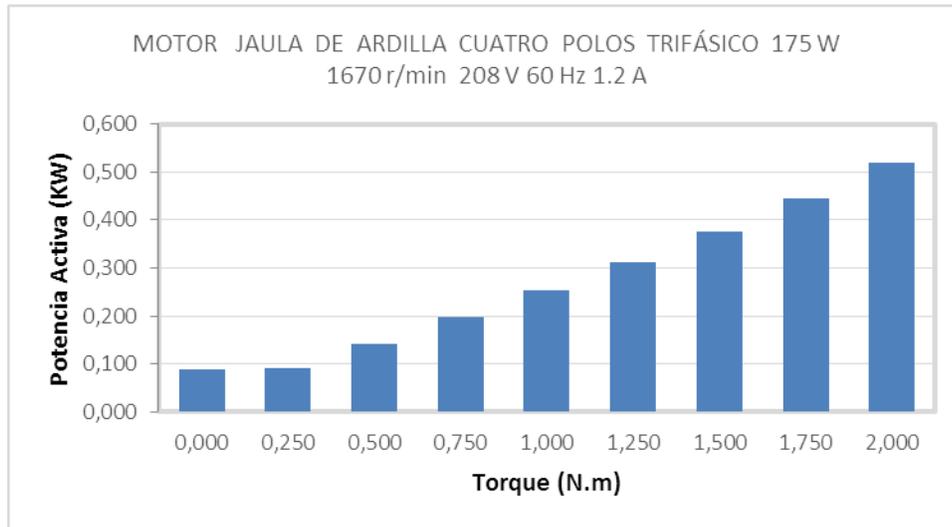


Figura 40. Resultado factor de potencia activa sin capacitares. Fuente: El Autor

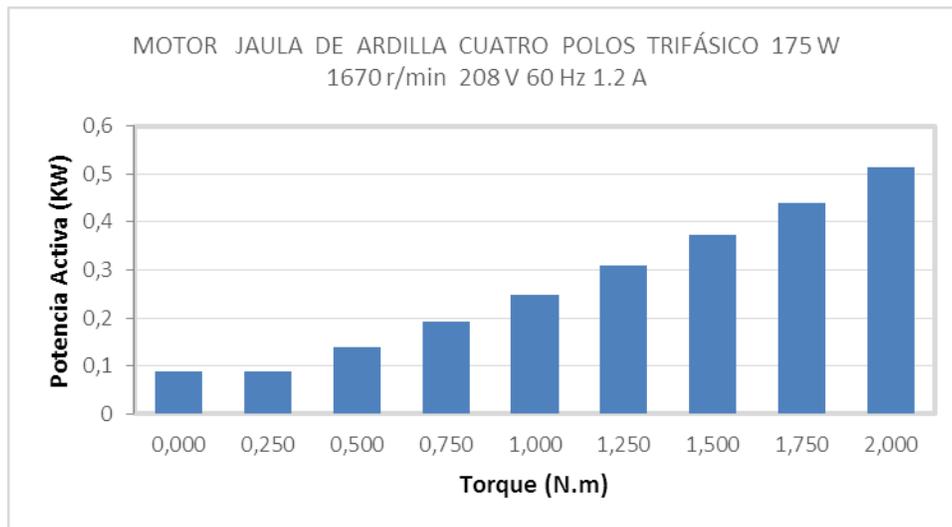


Figura 41. Resultado factor de potencia activa con capacitores fijos de 4µF. Fuente: El Autor

Nuevamente, se evidenció en las figuras 31 y 32 que la potencia activa no cambia con capacitores o sin capacitores y se comprueba matemáticamente a través de la ecuación 1.

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \phi \quad \text{Ecuación 1}$$

En la medida que aumenta el $\cos \phi$ disminuye la corriente I_1 , permaneciendo prácticamente constante la potencia activa. Es importante tener en cuenta que las pérdidas por efecto Joule dependen de la intensidad de corriente al cuadrado circulante por el conductor, lo que conduce a evitar que estas corrientes aumenten caso de tener un factor de potencia por debajo de 0,9.

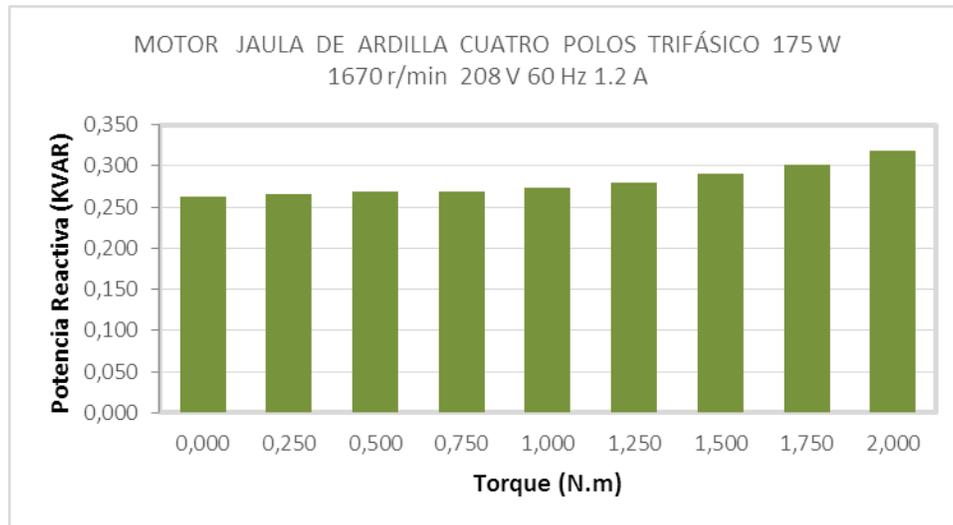


Figura 42. Resultado potencia reactiva sin capacitores. Fuente: El Autor

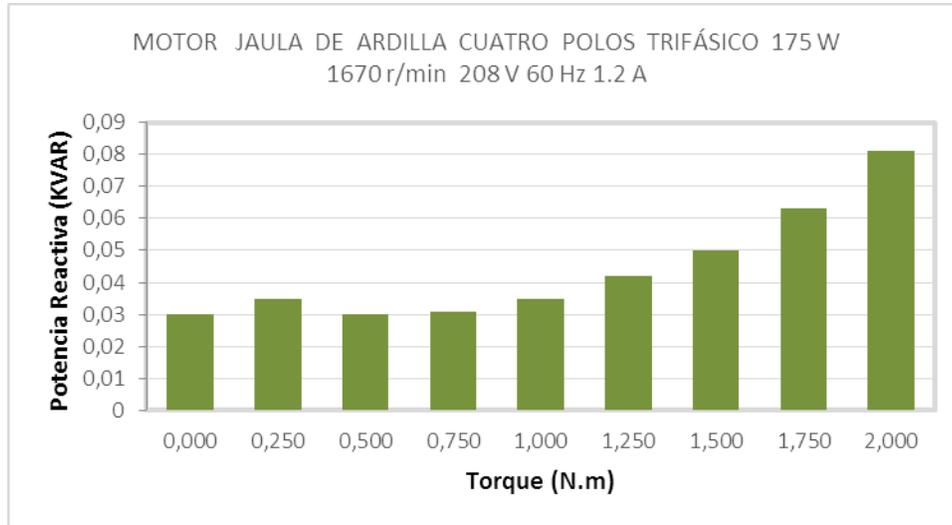


Figura 43. Resultado potencia reactiva con capacitores. Fuente: El Autor

Las figuras 33 y 34 evidencian que la potencia reactiva se mejoró sustancialmente con capacitores. Teniendo en cuenta el par nominal del motor 1.5 Nm, la potencia reactiva sin capacitores fue de 0.290 Kvar y con capacitores fue de 0.05 Kvar; una diferencia apreciable en un consumo que no produce trabajo. Los dos últimos valores no se tuvieron en cuenta porque el factor de potencia se vuelve capacitivo y dispara el consumo de reactivos.

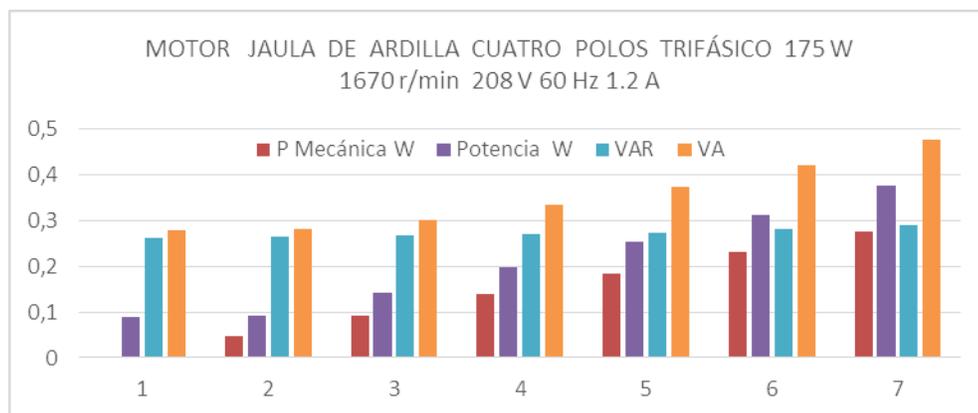


Figura 44. Resumen de potencias. Fuente: El Autor

Teniendo en cuenta los datos de base de la tabla y la figura 35 cuando el motor no tiene capacitores para corregir el factor de potencia ocurre lo siguiente:

Para valores de potencia mecánica de salida pequeños, la potencia reactiva sobrepasa la activa, siendo penalizada por el operador de red.

Para valores altos de potencia mecánica, cercanos al nominal del motor, la potencia reactiva disminuye con respecto a la activa acercándose al valor requerido por el operador de red. Una sencilla forma para determinar si cumple con el factor de potencia es verificar si el consumo de reactivos es ligeramente menor a la mitad de la activa.

Esto confirma que los motores al trabajar a plena carga requieren menos capacitores para mejorar el factor de potencia.

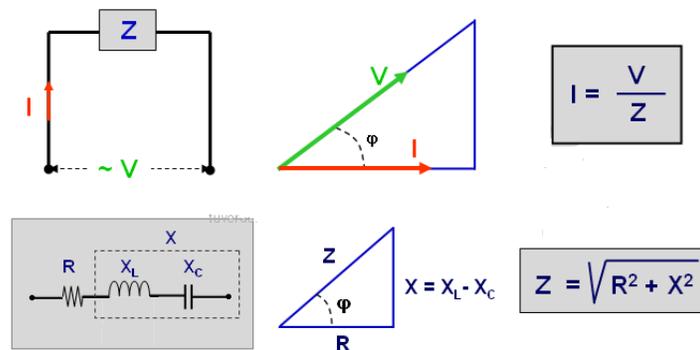


Figura 45. Triángulo de potencias e impedancias. Fuente: Lawrie, 2002

Donde:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - (1/\omega C))^2}$$

Introduciendo las siguientes simplificaciones,

$$X_L = \omega L \quad X_C = 1/\omega C \quad X = X_L - X_C$$

Se escribe:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Por otra parte, el desfase ϕ , viene dado por la expresión:

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}$$

La magnitud X recibe el nombre de reactancia; X_L y X_C son la reactancia inductiva o inductancia y la reactancia capacitiva o capacitancia respectivamente. Tanto la impedancia como la reactancia se miden en ohmios (Ω).

Teniendo en cuenta que la velocidad del motor permanece constante en cada uno de los valores del par y corresponde a 1760 r/min, se puede obtener la potencia mecánica de salida del motor de salida en función de la velocidad rotacional y el par disponible en el eje.

Así mismo, de acuerdo con lo anterior, para el cálculo del rendimiento del motor es necesario lo siguiente:

$$P = (M)(W)$$

Donde:

P es la potencia (en W)

M es el par motor (en N•m)

W es la velocidad angular (en rad/s)

Se tomaron los datos del medidor de energía trifásico digital para un motor jaula de ardilla cuatro polos trifásico 175 W 1670 r/min 208 V 60 Hz 1.2 a con un banco de capacitores DE 4 μ F.

Tabla 12. Resumen medidas de potencia

MEDIDA	POTENCIA MECÁNICA	TORQUE (N. m)	POTENCIA ACTIVA (KW)	EFICIENCIA	POTENCIA APARENTE KVA
1	0	0,000	0,088	0	0,093
2	0,046	0,250	0,088	0,484	0,095
3	0,092	0,500	0,139	0,648	0,142
4	0,138	0,750	0,192	0,707	0,195
5	0,184	1,000	0,249	0,730	0,252
6	0,230	1,250	0,310	0,737	0,312

De acuerdo con lo anterior, se pudo determinar que el motor a plena carga tuvo una eficiencia del 74,2%.

Tabla 13. Límite inferior nominal para eficiencia super premium (IE4) (%) 60Hz

PN (kW)	Número de polos			
	2	4	6	8
0,18	70,0	74,0	72,0	68,0
0,25	74,0	77,0	75,5	72,0
0,37	77,0	81,5	78,5	75,5
0,55	80,0	84,0	82,5	77,0
0,75	82,5	85,5	84,0	78,5

PN (kW)	Número de polos			
	2	4	6	8
1,1	85,5	87,5	88,5	81,5
1,5	86,5	88,5	89,5	85,5
2,2	88,5	91,0	90,2	87,5
3,7	89,5	91,0	90,2	88,5
5,5	90,2	92,4	91,7	88,5
7,5	91,7	92,4	92,4	91,0
11	92,4	93,6	93,0	91,0
15	92,4	94,1	93,0	91,7
18,5	93,0	94,5	94,1	91,7
22	93,0	94,5	94,1	93,0
30	93,6	95,0	95,0	93,0
37	94,1	95,4	95,0	93,6
45	94,5	95,4	95,4	93,6
55	94,5	95,8	95,4	94,5
75	95,0	96,2	95,8	94,5
90	95,4	96,2	95,8	95,0
PN (kW)	Número de polos			
	2	4	6	8
110	95,4	96,2	96,2	95,0
150	95,8	96,5	96,2	95,4
185	96,2	96,5	96,2	95,4
220	96,2	96,8	96,5	95,4
250 hasta 375	96,2	96,8	96,5	95,8

De acuerdo con la clasificación de que trata el numeral 12.1.1.2 de RETIQ y los resultados del ensayo indicado en el numeral 12.4., los motores se deben clasificar en el rango de eficiencia acuerdo con la tabla 13.

Tabla 14. Rangos de eficiencia energética para motores trifásicos

Rango	Límite inferior Eficiencia nominal (incluido)	Límite superior Eficiencia nominal (no incluido)	Designación clase de eficiencia
A	Valores de tabla 12.1.1.2 A	100%	Eficiencia super premium
B	Valores de tabla 12.1.1.2 B	Valores de tabla 12.1.1.2 A	Eficiencia premium (IE3)
C	Valores de tabla 12.1.1.2 C	Valores de tabla 12.1.1.2 B	Eficiencia alta (IE2)
D	Valores de tabla 12.1.1.2 D	Valores de tabla 12.1.1.2 C	Eficiencia estándar (IE1)
E	50%	Valores de tabla 12.1.1.2 D	Baja eficiencia

Fuente: RETIQ

Se determina que tendría la letra A en la etiqueta mostrando que es un motor de eficiencia super Premium. Datos tomados del medidor de energía trifásico digital para un motor jaula de ardilla cuatro polos trifásico 175 W 1670 r/min 208 V 60 Hz 1.2 a sin banco de capacitores de 4 μ F.

Tabla 15. Rangos de eficiencia energética para motores trifásicos

MEDIDA	POTENCIA MECÁNICA	TORQUE (N. m)	POTENCIA ACTIVA (KW)	EFICIENCIA	POTENCIA APARENTE KVA
1	0	0,000	0,090	0	0,278
2	0,046	0,250	0,091	0,164	0,281
3	0,092	0,500	0,142	0,305	0,302
4	0,138	0,750	0,197	0,414	0,333
5	0,184	1,000	0,253	0,492	0,374
6	0,230	1,250	0,312	0,548	0,420
7	0,276	1,500	0,376	0,581	0,475

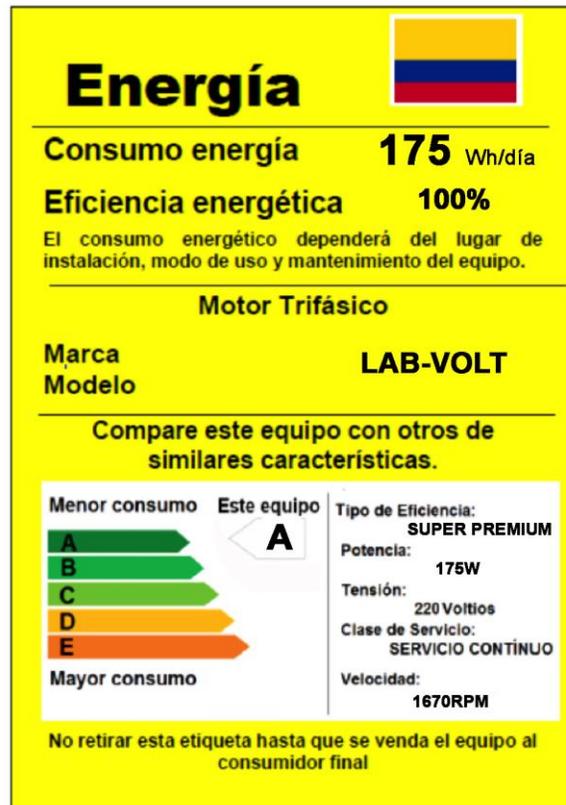


Figura 46. Etiqueta asignada para el motor de prueba Labvolt. Fuente: Adaptado por el autor a partir de Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ, 2015

6.3 Entrega de Motor para Pruebas

Se implementó un motor acoplado a un generador de corriente continua para realizar pruebas adicionales con diferentes cargas en el generador.



Figura 47. Motor acoplado a un generador de CC para pruebas de laboratorio. Fuente: El Autor

7. Presupuesto Económico

El presupuesto económico para la realización del presente trabajo se muestra en la tabla. 15.

Tabla 16. Presupuesto

DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	CANT	PROVEEDOR	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL	OBSERVACIONES
Equipos	Unidad	12	Siemens Schneider		\$ 11.200.000	Osciloscopios, motores, autómatas , variadores de velocidad etc.
Materiales	Metros	50	Electrocúcuta		\$1. 540.000	Cable de potencia y control
Internet	Año	3	UNE	\$ 400.000	\$ 1.200.000	Consultas
Tableros eléctricos	Unidad	3	Construcción propia	\$ 200.000	\$ 600.000	Tableros para fuerza y control de motores, automatización y variación de velocidad
Papelería	Varios		Propia	\$250.000	\$ 250.000	Impresiones, C.D. USB, carpetas, sobres, etc.
Elementos de protección y seguridad	Unidad	2	Propio	\$ 50.000	\$ 100.000	Utilizados para la realización de las pruebas, casco, botas dieléctricas, etc.
Equipos de Medida	Unidad		Propios		\$2000.000	Medidor de energía, pinza amperimétrica tester, sensores de temperatura, humedad, par etc.
Imprevistos			Propio	\$ 70.000	\$ 70.000	
TOTAL EN PESOS COLOMBIANOS					\$16.960.000	

8. Fuentes de Financiación

Los gastos involucrados en el desarrollo del presente trabajo fueron financiados por cuenta propia.

9. Conclusiones

Durante el proceso de construcción de la estación experimental se determinó que la tecnología requerida (Lab-volt) se encuentra disponible actualmente y se puede utilizar en el mejoramiento de los procesos académicos y de formación en las áreas de ingenierías.

Se demostró que la estación Lab-volt se puede adaptar para realizar pruebas con motores trifásicos hasta 5 HP con el fin de compararlos con los parámetros establecidos en el RETIQ.

Los resultados obtenidos registran el mismo valor de los parámetros de energía que presenta el medidor del operador de red. Se confirma que los datos almacenados en el computador son confiables para realizar las pruebas que exige el RETIQ verificando los valores de la etiqueta de los motores.

Se realizaron las pruebas de los parámetros eléctricos a un motor de pequeña potencia, comprobando que el equipo Lab-volt es una unidad de alta eficiencia.

Al analizar los resultados de forma comparativa con los requerimientos exigidos por el Reglamento Técnico de Etiquetado RETIQ, se concluye que el motor tiene una etiqueta clase A, con la característica de “eficiencia super premium”, cuando tiene el factor de potencia corregido, respecto a los rangos de eficiencia energética para motores trifásicos.

10. Recomendaciones

Continuar con la adaptación de la estación experimental Lab-volt construyendo bases dependiendo del motor de prueba y sus respectivos acoples, que permitan instalar con facilidad el freno electromagnético.

Construir módulos para diferentes tipos de arranques, que permitan las demostraciones de los cálculos matemáticos de las variables eléctricas y mecánicas.

Ampliar las pruebas a motores de hasta 5HP trifásicos con el fin de establecer a nivel científico, las alternativas de mejoramiento en la construcción de las partes constitutivas del motor y de esta forma disminuir el consumo energético del motor respecto al par mecánico, tal como se menciona en el artículo de Duarte, Guerrero & Carvajal (2017) “Estimación de los parámetros de motores de inducción a partir de las medidas de pérdidas de potencia”.

Diseñar guías de laboratorio para la enseñanza en diferentes pruebas que permite la estación experimental, de manera que se pueda optimizar su uso a nivel de pregrado y posgrado.

Referencias Bibliográficas

- Acosta, G.; Verucchi, C.; Peñalva, C.; Gelso, E. & Villamayor, E. (2002). Sistema de monitoreo y diagnóstico de fallas para motores de inducción. En: X Congreso Latinoamericano de Control Automático CLCA 2002, Guadalajara, México.
- Aspalli, M., Shetagar, S. & Kodad, S. (2008). “Estimation of induction motor field efficiency for energy audit and management using genetic algorithm”, en IEEE 3rd International Conference on Sensing Technology, 440-445.
- Babaei, H. & Zayandehroodi, H. (2015). “Estimation of induction motor efficiency value by nature based optimization algorithm”, International Journal of Review in Life Sciences, 5, (8), 473-481.
- Bae, D., Kim, D., Jung, H., Hahn, Y. & Koh, S. (1997). “Determination of induction motor parameters by using neural network based on FEM results”, IEEE Transactions on Magnetism, 33(2), 1924–1927.
- Biriescu, M.; Groza, V.; Cretu, V.; Mot, M. & Madescu, Gh. (2001). Testing of electrical machines using a data acquisition and processing system. Workshop on Electrical Machines Parameters, Technical University of Cluj-Napoca.
- Caballero, H. & Huertas, J. (2008). Diagnóstico de Motores Eléctricos Mediante Análisis Espectral de Corrientes. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Castelli, M. & Andrade, M. (2007). Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción, Montevideo: URUMAN.

- Cepeda, A. & Chassande, J. (1993). Ensayos de Máquinas Sincrónicas. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Cepeda, A. & Chassande, J. (1999). Determinación del Circuito Equivalente de una Máquina Asíncrona. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Chapman, S. (2000). Máquinas Eléctricas. México: Mc Graw Hill.
- Charette, A., Xu, J., Ba-Razzouk, A., Pillay, P. & Rajagopalan, V. (2000). “The use of the genetic algorithm for in-situ efficiency measurement of an induction motor”, en Proc.IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 1, 392-397.
- Chassande, J. (1999). Máquinas de Inducción o Máquinas Asíncronas. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Chassande, J., Cepeda, A. & Molina, J. (1999). Ensayos de máquinas de corriente continua. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos. (1997). NORMA Oficial Mexicana NOM-014-ENER-1997, Eficiencia energética de motores de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, de uso general en potencia nominal de 0,180 a 1,500 kW. Límites, método de prueba y marcado. México: CCNNPURRE.
- Congreso de la Republica. (2001). Ley 697. (3, octubre, 2001). Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones. Bogotá: Diario oficial. no. 44573.

Delores, E. (1992). Solución de problemas de Ingeniería con Matlab. México: Prentice Hall.

Diario El Tiempo. (2008). ¿Qué es mejor el torque o los caballos?. Recuperado de:

<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-4738244>

Fitzgerald, A., Kingsley, Ch. & Umans, S. (2004). Máquinas Eléctricas. México: McGraw-Hill.

Fraile, J. (2003). Máquinas Eléctricas. Madrid: Mc Graw-Hill.

Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE. (1984). IEEE Std. 112-84. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motor and Generators; ANSI/IEEE. NY: IEEE.

Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE. (1985). IEEE Std. 113 Guide. Tests Procedure for Direct Current Machines. Published by The Institute of Electrical and Electronic Engineers Inc. NY: IEEE.

Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE. (1995). IEEE 115 Guide: Test Procedure for Synchronous Machines. Part I. ANSI/IEEE. NY: IEEE.

International Electrotechnical Commission. (1972). IEC 34-2 Rotating Electric Machines. Part 2. Methods for Determining Losses and Efficiency of Rotating Electrical Machinery from Test. Ginebra: International Electrotechnical Commission.

International Electrotechnical Commission. (1972). IEC 60034-30 Rotating electrical machines – part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-CODE). Ginebra: International Electrotechnical Commission.

- International Electrotechnical Commission. (2007). IEC 60034-2-1 “Rotating electrical machines. Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (2007)”. Ginebra: IEC.
- Jimmie, J. (2002). Cathey: Máquinas Eléctricas Análisis y Diseño aplicando Matlab. México: McGraw Hill.
- Kosow, I. (1993). Máquinas Eléctricas y Transformadores. México: Pearson Prentice-Hall.
- Kostov, I., Spasov, V. & Rangelova, V. (2009). “Application of genetic algorithms for determining the parameters of induction motors”, Technical Gazette, 16(2), 49-53, 2009.
- Lafosse, M. (1965). Manual Práctico de Medidas Eléctricas y de Ensayos de Máquinas. Bilbao: Urmos.
- Langsdorf, A. (1970). Teoría de las Máquinas de Corriente Alterna. México: McGraw-Hill.
- Leiva, F. & Allen, J. (2010). Montaje de un banco de prueba para motores y generadores para el cálculo de la eficiencia especialmente. Universidad de Costa Rica, San José: Costa Rica.
- Mariscal, J. & Reyes C. (2008). Desarrollo de un Banco de Pruebas para Motores Monofásicos/Trifásicos. México: Ingeniería y Control Integral.
- Marques, J., Machado, F. & Cardoso, J. (2012). “Induction Motor parameter determination using the Harmony Search Algorithm to power, torque and speed Estimation”, en 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1835 – 1840.

Mejía, E., Posada, J. & Scarpetta, J. (2008). Banco de pruebas para motores de inducción. *Revista Energía y Computación*, 29(16), 43 – 49.

Ministerio de Minas y Energía. (2003). Decreto 3683 (19, diciembre, 2003). Por el cual se reglamenta la Ley 697 de 2001 y se crea una Comisión Intersectorial. Bogotá: El Ministerio.

Ministerio de Minas y Energía. (2015). Reglamento Técnico de Etiquetado – RETIQ. Bogotá: El Ministerio.

Mohammadi, H. & Akhavan, A. (2014). “Parameter Estimation of Three-Phase Induction Motor Using Hybrid of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization”, *Hindawi Publishing Corporation Journal of Engineering*, p.6.

Muñoz, N., Valencia, A. & Villada, F. (2006). Nuevas estrategias de monitoreo en línea para motores de inducción. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

Nema, M. (1989). *Motor and Generator*. USA: National Electrical Manufacturers Association.

Phumiphak, T. Chat-uthai, C. (2002). “Estimation of induction motor parameters based on field test coupled with genetic algorithm”, en *Proc. of the International Conference on Power System Technology*, 2, 1199-1203.

Prias, O. (2009). Consultoría para la recopilación de información, definición de lineamientos y prioridades como apoyo a la formulación del PROURE. Informe Final. Bogotá: El Autor.

- Sakthivel, V., Bhuvaneshwari, R. & Subramanian, S. (2010). “Artificial immune system for parameter estimation of induction motor,” *Expert Systems with Applications*, 37(8), 6109–6115.
- Sakthivel, V., Bhuvaneshwari, R. & Subramanian, S. (2011). “An accurate and economical approach for induction motor field efficiency estimation using bacterial foraging algorithm,” *Journal of the International Measurement Confederation*, 44, 674–684.
- SaludBlog. (2017). Caballo de fuerza. Recuperado de: <http://lasaludfamiliar.com/caja-de-cerebro/conocimiento-6590.html>
- Soong, W. (2008). *DC Machines: Parameter Measurement and Performance Prediction*. School of Electrical and Electronic Engineering, University of Adelaide. Australia.
- Sorandaru, C. & Musuroi, S. (2005). *Low Cost Data Acquisition Setup for Electrical Machines Laboratory*. Politehnica University of Timisoara. Timisoara, Romania.
- Spasov, V., Rangelova, V., Kostov, I. & Drambalov, V. (2014). “An efficient approach for determining induction motors parameters”, *Acta Tehnica Corviniensis - Bulletin of Engineering*, tomo VII, no. 2, pp. 117-122.
- Tai, Y., Liu, Z., Yu, H. & Liu, J. (2011). “Efficiency optimization of induction motors using genetic algorithm and hybrid genetic algorithm”, en *IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp. 1-4
- The Mathworks – Matlab. (2000). *Data Acquisition Toolbox User’s Manual*. Sn.
- Thumann, A. (2008). *Handbook of energy audit*. US: Fairmont Press.

- Torres, J. & Asiain, T. (2008). Determinación de los perfiles de temperatura en un motor de inducción jaula de ardilla mediante un sistema de adquisición de datos PCI-6023E y LabVIEW. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Tretrong, J. (2010). Electric Motor Fault Diagnosis Based on Parameter Estimation Approach Using Genetic Algorithm. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Hong Kong: IMECS.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2007). Guía didáctica para el desarrollo de auditorías energéticas. Bogotá: UPME.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2008). Sistema de gestión integral de la energía. Guía para la implementación. Bogotá: UPME y COLCIENCIAS.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (s.f). Estrategia de uso racional de la energía en el sector industrial colombiano. Informe final. Bogotá: UPME.
- Ursem, R. & Vadstrup, P. (2003). "Parameter identification of induction motors using differential evolution," en Congreso Evolutionary Computation (CEC), 2, 790–796.
- Ursem, R. & Vadstrup, P. (2004). Parameter identification of induction motors using stochastic optimization algorithms, Applied Soft Computing, 4(1), 49-64.
- Vas, P. (1993). Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines. Oxford: Oxford Science Publications.

- Vázquez, L., Ocampo, R. & Gonzáles, J. (2007). Banco de pruebas para un variador de frecuencia aplicado a una bomba. En: XV EXPODIME, Universidad de Guadalajara, Departamento de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Guadalajara, México.
- Vera Romero, Carlos A.; Díaz Rodríguez, Jorge L. y Pardo García, Aldo. “Características dinámicas en los procesos transitorios del motor de inducción de rotor jaula de ardilla”. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol. 1, No. 11, Año 2008.
- Vera, C. (2007). Características dinámicas en los procesos transitorios del motor de inducción rotor jaula de ardilla. Trabajo de Maestría. Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia.
- Vera, C., Duran, C. & Díaz, J. (2008). Sistema de adquisición de datos con Matlab-Simulink usando la tarjeta PCI 6023E de Nacional Instruments. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 2(12), 1-15.
- Wells, L. K. & Travis, J. (1996). LabVIEW for Everyone. NY: Prentice Hall.
- Wells, L. K. & Travis, J. (1997). LabVIEW Signal Processing Course Manual, version 1.0. US: National Instruments.
- Wells, L. K. & Travis, J. (2000). LabVIEW Basics I Course Manual, version 6.0. US: National Instruments.
- Wells, L. K. & Travis, J. (2000). LabVIEW Basics II Course Manual, version 6.0. US: National Instruments.
- Wikipedia. (2015). Caballo de fuerza. Recuperado de: <https://en.wikipedia.org/wiki/Horsepower>

Wikipedia. (2016). Kilogramo. Recuperado de: Tomado de
<https://es.wikipedia.org/wiki/Kilogramo>

Wildi, T. (2007). Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia. México: Pearson.

Glosario

Para mayor información se tienen en cuenta las definiciones adaptadas de las normas como la IEC 60034-30 rotating electrical machines – Part 30: efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-CODE) (International Electrotechnical Commission, 1972) y la norma oficial Mexicana NOM-014-ENER-1997, Eficiencia energética de motores de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, de uso general en potencia nominal de 0,180 a 1,500 kW. Límites, método de prueba y marcado (Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos, 1997).

- IEC 60034-1, Máquinas eléctricas rotativas - Parte 1: Características y prestaciones
- IEC 60034-2-1 2007, Máquinas eléctricas rotativas - Parte 2-1: Métodos estándar para la determinación las pérdidas y la eficiencia de los ensayos (excepto las máquinas para vehículos de tracción)
- IEC 60034-30: 2008 Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code). Geneve, 2008, 40 p, il.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002, Eficiencia energética de motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, en potencia nominal de 0,746 a 373 kW. Límites, método de prueba y marcado.
- Ley Federal sobre Metrología y Normalización, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 1 de julio de 1992.

- Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 14 de enero de 1999.
- NOM-016-ENER-1997 Eficiencia energética de motores de corriente alterna trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, de uso general en potencia nominal de 0,746 a 149,2 kW. Límites, método de prueba y marcado, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 17 de junio de 1998.
- NMX-Z-013/1-1977 Guía para la redacción, estructuración y presentación de las normas oficiales mexicanas, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 31 de octubre de 1977.
- NMX-J-075/1-ANCE Aparatos Eléctricos-Máquinas Rotatorias Parte 1: Motores de Inducción de Corriente Alterna del Tipo de Rotor en Cortocircuito, en Potencias Desde 0,062 a 373 kW-Especificaciones.
- NMX-J-075/2-ANCE Aparatos Eléctricos-Máquinas Rotatorias Parte 2: Motores de Inducción de Corriente Alterna del Tipo de Rotor en Cortocircuito, en Potencias Grandes-Especificaciones.
- NMX-J-075/3-ANCE. Aparatos Eléctricos-Máquinas Rotatorias Parte 3: Métodos de Prueba para Motores de Inducción de Corriente Alterna del Tipo de Rotor en Cortocircuito, en Potencias desde 0,062 kW-Métodos de Prueba.
- CSA C390. Energy Efficiency Test Methods for Three-Phase Induction Motors.
- CSA C22.2-100. Motors and Generators.

- IEEE Std. 112. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.

- NEMA MG 1. Motors and Generators.

- IEEE 519-1992. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems

- Motor con freno: motor equipado con un freno electro-mecánico que opera directamente sobre el eje del motor, sin acoplamientos

- Moto reductor: motor directamente conectado a un reductor sin acoplamiento (por ejemplo el primer piñón esta fijado al eje del motor)

- Moto bomba: motor directamente conectado a una bomba sin acoplamiento

- Eficiencia promedio: El valor promedio de eficiencia para una población de motores con el mismo diseño y características

- Eficiencia nominal: Valor de eficiencia exigido para una determinada clase de eficiencia de acuerdo con las tablas de eficiencia presentadas en este Reglamento.

- Eficiencia asignada: Valor de eficiencia declarado por el fabricante, igual o mayor al valor de la eficiencia nominal

- Dinamómetro: Artefacto para aplicar carga mecánica a un motor en forma continua y controlada, y que puede incluir dispositivos para medir el par torsional y la frecuencia de rotación desarrollados por dicho motor.

- Eficiencia: La eficiencia se define como la razón entre la potencia de salida y la potencia de entrada del motor. Se expresa en porcentaje y se calcula con alguna de las siguientes relaciones:

(a) $[\text{Potencia de salida} / \text{potencia de entrada}] \times 100,$

(b) $[(\text{Potencia de entrada} - \text{pérdidas}) / \text{potencia de entrada}] \times 100,$

(c) $[\text{Potencia de salida} / (\text{potencia de salida} + \text{pérdidas})] \times 100.$

- Eficiencia mínima asociada: Cada eficiencia nominal tiene una eficiencia mínima asociada especificada en la tabla para motores monofásicos y para motores trifásicos.

- Eficiencia nominal: Es el valor de la eficiencia mostrado en la placa de datos del motor, seleccionado por el fabricante de la tabla para motores monofásicos y para motores trifásicos. Este valor no debe ser mayor que la eficiencia promedio de una población grande de motores del mismo diseño.

- Equilibrio térmico a carga plena: Cuando, durante la prueba de temperatura, la temperatura del motor no varía en más de 1°C, en un lapso de 30 minutos trabajando a plena carga.

- Factor de corrección del dinamómetro (FCD): Es el par torsional necesario para vencer la oposición que presenta el dinamómetro al movimiento mecánico, en su condición de carga mínima. Su determinación es importante cuando el dinamómetro está situado entre el motor a probar y el transductor usado para medir el par.

- Motor abierto: Es un motor que tiene aberturas para ventilación que permiten el paso del aire exterior de enfriamiento, sobre y a través del embobinado del motor.

- **Motor cerrado:** Es un motor cuya carcasa impide el intercambio libre de aire entre el interior y el exterior de éste, sin llegar a ser hermético. Dentro de esta clasificación se incluyen los motores a prueba de explosión.

- **Motor con condensador:** Es un motor monofásico cuyo embobinado principal se conecta directamente a la fuente de energía y su embobinado auxiliar, desplazado 90° eléctricos respecto al embobinado principal, se conecta en serie con un condensador. Se clasifican en:

Motor con condensador de arranque: El condensador permanece conectado al circuito únicamente durante el arranque.

Motor con condensador permanentemente conectado: El condensador siempre está conectado a su embobinado, durante el arranque y la operación.

Motor con dos condensadores: Tiene dos condensadores conectados a sus embobinados durante el arranque y uno de ellos permanece conectado durante la operación.

Nota: se debe entender por condensador un valor de capacitancia que no es proporcionado necesariamente por un solo condensador, sino que pueden ser arreglos de varios condensadores.

- **Motor de eficiencia normalizada:** Es aquel que tiene una eficiencia nominal igual o mayor que la indicada en la tabla para motores monofásicos según su potencia y tensión nominal, y en para motores trifásicos, según su tipo de encerramiento y número de polos.

- Motor de fase dividida: Es un motor monofásico cuyo embobinado principal se conecta directamente a la fuente de energía y su embobinado auxiliar, desplazado 90° eléctricos con respecto al embobinado principal, se conecta a la fuente de energía únicamente durante el arranque.
- Motor de inducción: Es un motor eléctrico en el cual solamente una parte, el rotor o el estator, se conecta a la fuente de energía y la otra trabaja por inducción electromagnética.
- Motor de uso general: Es un motor enfriado por aire, abierto o cerrado, con eje horizontal, cuya construcción no tiene efecto en su aplicación y es capaz de trabajar a régimen continuo.
- Motor eléctrico: Es una máquina rotatoria para convertir energía eléctrica en mecánica.
- Motor monofásico: Es un motor que utiliza para su operación energía eléctrica de corriente alterna monofásica.
- Motor trifásico: Es un motor que utiliza para su operación energía eléctrica de corriente alterna trifásica.
- Motor tipo jaula de ardilla: Es un motor de inducción, en el cual los conductores del rotor son barras colocadas en las ranuras del núcleo secundario, que se conectan en cortocircuito por medio de anillos en sus extremos semejando una jaula de ardilla.
- Pérdidas en el núcleo: Son las debidas a las alternaciones del campo magnético en el material activo del estator y el rotor por efectos de histéresis y corrientes parásitas.
- Pérdidas adicionales: Son la porción de las pérdidas que no se incluyen en la suma de las pérdidas por efecto Joule en el estator y en el rotor, las pérdidas en el núcleo, y las pérdidas por fricción y ventilación.

- Pérdidas por efecto Joule: Son las debidas a la circulación de corriente eléctrica por los conductores del estator y rotor y se manifiestan en forma de calor.

- Pérdidas por fricción y ventilación: Son las debidas a la oposición que presentan los dispositivos tales como ventiladores y rodamientos al movimiento mecánico.

- Pérdidas totales: Son la diferencia de la potencia de entrada y la potencia de salida del motor.

- Potencia de entrada: Es la potencia eléctrica que el motor toma de la línea.

- Potencia de salida: Es la potencia mecánica disponible en el eje del motor.

- Potencia nominal: Es la potencia mecánica de salida indicada en la placa de datos del motor.

- Régimen continuo: Es el régimen nominal con el cual debe cumplir un motor en funcionamiento continuo.

- Régimen nominal: Es la condición de operación a la tensión y frecuencia eléctricas nominales, medidas en los terminales, en la que el motor desarrolla los parámetros indicados en su placa de datos.

- Resistencia entre terminales del motor: Es la resistencia medida entre dos terminales en la caja de conexiones del motor.

- Torquímetro: Artefacto acoplado entre los ejes del motor y del dinamómetro, que trasmite y mide el par torsional. Algunos tipos miden además la frecuencia de rotación y permiten determinar la potencia mecánica desarrollada por el motor.

Abreviaturas

CAN	Comunidad Andina de Naciones
CLF	Factor de carga de enfriamiento
FA	Factor de ajuste
FCD	Factor de corrección del dinamómetro
FEE	Factor de eficiencia de energía
IEC	International Electrotechnical Commission
ILAC	International Laboratory Accreditation Cooperation
ISO	International Standard Organization
MINCOMERCIO	Ministerio de Comercio, Industria y Turismo
MINMINAS	Ministerio de Minas y Energía
NTC	Norma Técnica Colombiana
OMC	Organización Mundial del Comercio
ONAC	Organismo Nacional de Acreditación
OTC	Obstáculos Técnicos al Comercio
PLF	Factor de carga parcial

RT	Reglamento Técnico
RTE	Reglamento Técnico de Etiquetado
RETIE	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas
RETILAP	Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público
SIC	Superintendencia de Industria y Comercio
URE	Uso Racional y Eficiente de energía
RETIQ	Reglamento Técnico de Etiquetado

Símbolos

η_n eficiencia nominal, %

η_N eficiencia asignada, %

f_N frecuencia nominal, Hz

n_N velocidad nominal, min^{-1}

P_N potencia nominal, kW

T_N torque nominal, Nm

12. U_N tensión nominal, V

ANEXOS

Anexo 1. Actividades en el laboratorio

Se evidencia que la potencia activa se mantiene constante con la carga con capacitores para corregir el factor de potencia o sin ellos, mientras que la potencia reactiva cambia sustancialmente y por consiguiente la potencia aparente. igualmente la intensidad de corriente total disminuye en la medida que el factor de potencia mejora esto debido a que la intensidad de corriente que circula por los capacitores se opone a la corriente inductiva.

ESTO ES DEMOSTRADO MATEMATICAMENTE Y COMPROBADO SU RESULTADO REAL					
MEDIDA	FACTOR DE POTENCIA	TORQUE (N. m)	POTENCIA ACTIVA (KW)	POTENCIA REACTIVA (KVAR)	POTENCIA APARENTE KVA
	0.954	0.00	0.088	0.030	0.093
2	0.946	0.25	0.088	0.035	0.095
3	0.981	0.50	0.139	0.030	0.142
4	0.990	0.75	0.192	0.031	0.195
5	0.993	1.00	0.249	0.035	0.252
6	0.994	1.25	0.310	0.042	0.312
7	0.994	1.50	0.372	0.050	0.376
8	0.093	1.75	0.440	0.063	0.444
9	0.091	2.00	0.513	0.081	0.920

DATOS TOMADOS DEL MEDIDOR DE ENERGÍA TRIFÁSICO DIGITAL PARA
UN MOTOR JAULA DE ARDILLA CUATRO POLOS TRIFÁSICO 175 W 1670 r/min
208 V 60 Hz 1.2 A

MEDIDA	FACTOR DE POTENCIA	TORQUE (N. m)	POTENCIA ACTIVA (KW)	POTENCIA REACTIVA (KVAR)	POTENCIA APARENTE KVA
1	0.333	0.00	0.090	0.262	0.278
2	0.344	0.25	0.091	0.266	0.281
3	0.497	0.50	0.142	0.268	0.302
4	0.622	0.75	0.197	0.269	0.333
5	0.708	1.00	0.253	0.274	0.374
6	0.767	1.25	0.312	0.280	0.420
7	0.809	1.50	0.376	0.290	0.475
8	0.842	1.75	0.445	0.301	0.538
9	0.864	2.00	0.520	0.318	0.609

Tabla de datos - Datos con capacitor

Archivo Edición Ver Opciones Ayuda *Lab-Volt*

	M1 E1 E1 CA (V)	M2 I1 I1 CA (A)	M3 FP (E1,I1) 3~ FP (E1,I1) 3~ Ver.	M4 f (E1) f (E1) (Hz)	M7 PQS1 (E1,I1) PQS1 (E1,I1) P (W)	M8 I2 I2 CA (A)	M5 I CA
1	223.7	0.238	0.953	60.03	-42.56	0.007	0.0
2	223.8	0.243	0.956	60.03	-43.56	0.007	0.0
3	223.6	0.368	0.982	60.05	-68.82	0.007	0.0
4	223.7	0.508	0.99	60.01	-95.65	0.007	0.0
5	223.9	0.652	0.993	60.02	-122.1	0.007	0.0
6	224.1	0.804	0.994	60.03	-149.1	0.007	0.0
7	224.1	0.959	0.993	60.04	-176.0	0.007	0.0
8	223.7	1.132	0.992	60.01	-204.6	0.007	0.0
9	223.3	1.329	0.99	60.01	-235.8	0.007	0.0
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							

Row: 10 Col: 1 M1 E1 V

Tabla de datos - Datos motor jaula de ardilla 4 polos agosto 19

Archivo Edición Ver Opciones Ayuda *Lab-Volt*

	M1 E1 E1 CA (V)	M2 I1 I1 CA (A)	M3 FP (E1,I1) 3~ FP (E1,I1) 3~ Ver.	M4 f (E1) f (E1) (Hz)	M7 PQS1 (E1,I1) PQS1 (E1,I1) P (W)	M8 I2 I2 CA (A)	M9 I3 I3 CA (A)	M10 I4 I4 CA (A)
1	223,7	0,699	0,346	60,02	26,28	0,007	0,007	0,006
2	223,6	0,701	0,35	60,0	25,74	0,007	0,007	0,006
3	223,8	0,748	0,497	60,05	0,372	0,007	0,007	0,006
4	223,8	0,835	0,622	60,0	-27,76	0,007	0,007	0,006
5	223,6	0,938	0,708	60,03	-55,03	0,007	0,007	0,006
6	223,6	1,062	0,766	60,02	-81,5	0,007	0,007	0,006
7	223,8	1,194	0,809	59,97	-108,8	0,007	0,007	0,006
8	223,8	1,357	0,84	59,99	-139,0	0,007	0,007	0,006
9	222,2	1,557	0,864	60,01	-172,1	0,007	0,007	0,006
10								
11								
12								
13								
14								
15								

LVDAC-EMS Práctica 1 Maestría Sin título - Bloc de n...