

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL MOTOR DE INDUCCIÓN  
TRIFÁSICO DE ROTOR DEVANADO UTILIZANDO LA NORMA NTC 3477-2008**

**ANDRES FELIPE ECHEVERRY HURTADO**

**MATHEO ESPINOSA GUARÍN**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA  
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA  
PEREIRA  
2014**

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL MOTOR DE INDUCCIÓN  
TRIFÁSICO DE ROTOR DEVANADO UTILIZANDO LA NORMA NTC 3477-2008**

**ANDRES FELIPE ECHEVERRY HURTADO**

**MATHEO ESPINOSA GUARÍN**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Tecnólogo en Electricidad**

**Director**

**M.Sc.(c) Santiago Gómez Estrada  
Profesor Auxiliar  
Universidad Tecnológica de Pereira**

**Asesor**

**M.Sc. Andrés Felipe Panesso Hernández  
Profesor Asistente  
Universidad de La Salle**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA  
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA  
PEREIRA  
2014**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Director  
*Ingeniero Electricista M.Sc.(c)*  
Santiago Gómez Estrada

---

Jurado

---

Director del programa de  
Tecnología Eléctrica  
*Ingeniero Electricista M.Sc.(c)*  
Santiago Gómez Estrada

Pereira, Noviembre de 2014.

## DEDICATORIA

Te doy gracias,  
Señor, Dios de todo,  
porque en todo lo  
mío Tú intervienes,  
porque es constante y  
eterno tu amor  
conmigo.  
Salmo 136

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente quiero agradecer a Dios y a mis padres por darme la oportunidad de finalizar un trabajo de grado que llevó un esfuerzo enorme. Al igual, a cada una de las personas que estuvo a mi lado en los momentos que más lo necesité y que más sentí que se iba de las manos a oportunidad de terminar este documento, agradezco al ingeniero Andrés Felipe Panesso por la paciencia, la entrega y la ayuda, tanto a distancia como personal, a Andrés F. Echeverry que fue mi compañero inseparable en todo el proceso de este proyecto. A todos y los que faltan, mil gracias por la ayuda en todos los momentos que la necesité.

Matheo Espinosa Guarín.

## CONTENIDO

	<b>pág.</b>
CONTENIDO .....	6
LISTA DE TABLAS .....	8
LISTA DE FIGURAS .....	9
GLOSARIO .....	10
RESUMEN .....	13
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Definición del problema .....	14
1.2. Motivación .....	14
1.3. Objetivos.....	15
1.3.1. Objetivo general.....	15
1.3.2. Objetivos específicos .....	15
1.4. Estructura del documento.....	15
2. ESTUDIO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO DE ROTOR DEVANADO.....	16
2.1. Introducción .....	16
2.2. Construcción y funcionamiento del motor de inducción trifásico .....	16
2.2.1. Ensayo de corriente continua .....	18
2.2.2. Ensayo sin carga o de vacío.....	18
2.2.3. Prueba de rotor bloqueado .....	18
2.2.4. Prueba de cargabilidad.....	19
2.3. Eficiencia del motor de inducción .....	20
3. PRUEBAS DE LABORATORIO Y DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA SEGÚN LA NTC 3477-2008 .....	22
3.1. Introducción .....	22
3.2. Resumen de la norma NTC 3477-2008: Medidas en vacío y pruebas de cargabilidad.....	22
3.2.1. Objetivos.....	22
3.2.2. Prueba en vacío.....	22
3.2.3. Prueba de rotor bloqueado .....	24
3.2.4. Prueba de cargabilidad.....	25
3.3. Resultados de la prueba de laboratorio.....	26

3.3.1. Resultados en el motor de inducción de rotor devanado LabVolt™. ....	26
3.3.2. Resultados en el motor de inducción de rotor devanado del grupo de trabajo 3.....	33
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	41
4.1. Conclusiones generales .....	41
4.2. Recomendaciones .....	41
5. Bibliografía.....	43

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Temperaturas medidas en los devanados después de la prueba.....	27
Tabla 2. Resultados de la prueba de vacío para el motor LabVolt™.....	28
Tabla 3. Datos para la extrapolación de la gráfica.....	28
Tabla 4. Temperaturas en los devanados al terminar la prueba de cargabilidad...30	30
Tabla 5. Resistencias del motor de LabVolt™.....	31
Tabla 6. Resultados prueba de cargabilidad en LabVolt™.....	32
Tabla 7. Resultados en la prueba de vacío para el motor del grupo 3.....	34
Tabla 8. Temperatura durante la prueba en vacío.....	34
Tabla 9. Datos para la extrapolación de la gráfica.....	35
Tabla 10. Temperatura después de la prueba de cargabilidad.....	36
Tabla 11. Resultados prueba de cargabilidad Grupo 3.....	37
Tabla 12. Resistencia del motor en la prueba de cargabilidad.....	38

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Diagrama de conexión del motor asíncrono trifásico de rotor devanado. .....	18
Figura 2. Circuito equivalente por fase de una máquina de inducción trifásica.....	19
Figura 3. Linealización de la curva para los valores de las pérdidas. ....	29
Figura 4. Conexión para el calentamiento de los devanados en LabVolt™. ....	29
Figura 5. Comparación eficiencias calculadas. ....	33
Figura 6. Extrapolación de los datos para el motor del grupo 3. ....	35
Figura 7. Conexión del regulador de tensión al motor. ....	38
Figura 8. Conexión de los medidores al motor.....	39
Figura 9. Método de los dos vatímetros. ....	40

## GLOSARIO

Todas las definiciones contenidas en el glosario son obtenidas de las normas técnicas NTC 3477-2008 [1] y NTC 5111-2002 [2].

**CD:** Corriente directa.

**CA:** Corriente alterna.

**Corriente de línea:** Para máquinas polifásicas de corriente alterna, el promedio aritmético de las corrientes de línea [1].

**Eficiencia:** Relación entre potencia de salida y la potencia de entrada, expresada en las mismas unidades y generalmente indicada en porcentaje [1].

**Ensayo con rotor bloqueado:** Ensayo en el cual el rotor se bloquea para evitar la rotación [1].

**Ensayo en estrella (*Eh-Star*):** Ensayo en el cual el motor funciona en una conexión en estrella con tensión desequilibrada [1].

**Ensayo sin carga (vacío):** Ensayo en el cual la máquina que funcionando como un motor, no suministra potencia mecánica de salida en el eje [1].

**Equilibrio térmico a carga plena:** Es el que se tiene cuando la variación de temperatura de las diferentes partes del motor, trabajando a carga plena, no excede de un grado Celsius en un lapso de 30 minutos [2].

**Método de circuito equivalente:** Ensayo en el cual las pérdidas se determinan con la ayuda de un modelo de circuito equivalente [1].

**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 [2].

**Motor de uso general:** Es un motor enfriado por aire, abierto o cerrado, con flecha horizontal, cuya construcción no tiene efecto en su aplicación y es capaz de trabajar a régimen continuo [2].

**Motor eléctrico:** Máquina para convertir energía eléctrica en mecánica [2].

**Motor trifásico:** Es un motor que utiliza para su operación energía eléctrica de corriente alterna trifásica [2].

**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 circuito corto por medio de anillos en sus extremos semejando una jaula de ardilla [2].

**Pérdidas adicionales con carga ( $P_{LL}$ ):** También conocidas como pérdidas suplementarias con carga. Son pérdidas producidas por la corriente de carga en el hierro activo y otras partes metálicas diferentes de los conductores; pérdidas de corriente parásita en los conductores de devanado causadas por pulsaciones de flujo dependientes de la corriente de carga. Estas pérdidas no incluyen las pérdidas adicionales en vacío [1].

**Pérdidas de carga ( $P_L$ ):** La suma de las pérdidas en el devanado ( $I^2R$ ) y se determina para en los devanados del estator y del rotor de las máquinas de inducción [1].

**Pérdidas en el hierro ( $P_{fe}$ ):** Pérdidas en el hierro activo y pérdidas adicionales en vacío en otras partes metálicas [1].

**Pérdidas fijas ( $P_k$ ):** Suma de las pérdidas en el hierro y las pérdidas por fricción y por ventilación [1].

**Pérdidas por fricción:** Pérdidas debidas a la fricción (rodamientos y escobillas, si no se superan las condiciones nominales) sin incluir las pérdidas en un sistema de lubricación separado. Las pérdidas en los rodamientos comunes se deberían establecer independientemente, sea o no que tales rodamientos se suministren con la máquina. Las pérdidas en los rodamientos se basan en las temperaturas de operación de los rodamientos, el tipo de aceite y la temperatura de éste. Si la máquina que se somete a ensayo utiliza refrigeración de flujo directo de los rodamientos, estas pérdidas se distribuyen entre la máquina que se ensaya y cualquier otra acoplada mecánicamente a ella, por ejemplo una turbina, en proporción a las masas de sus partes rotatorias. Si no existe refrigeración de flujo directo, la distribución de las pérdidas del rodamiento se debe determinar mediante acuerdo a partir de fórmulas empíricas [1].

**Pérdidas por fricción y por ventilación ( $P_{fw}$ ):** Suma de las pérdidas por fricción y por ventilación.

**Pérdidas por ventilación:** Pérdidas totales que se deben a la fricción aerodinámica en todas las partes de la máquina, incluyendo la potencia que se absorbe en los ventiladores montados en el eje, y en las máquinas auxiliares que forman parte

integral de la máquina. Las pérdidas en un sistema de ventilación separado se deberían enumerar independientemente [1].

**Pérdidas totales ( $P_T$ ):** Diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida que equivale a la suma de las pérdidas fijas, las pérdidas de carga y las pérdidas adicionales de carga [1].

**Potencia de entrada:** Es la potencia eléctrica que el motor toma de la línea [2].

**Potencia de salida:** Es la potencia mecánica disponible en el eje del motor [2].

**Potencia nominal:** Es la potencia de salida indicada en la placa de características del motor [2].

**Régimen continuo:** Es el régimen nominal con el cual debe cumplir un motor en funcionamiento continuo indefinidamente [2].

**Régimen nominal:** Es la condición de operación a la tensión y frecuencia eléctricas nominales en la que el motor desarrolla los parámetros indicados en su placa de características [2].

**Resistencia entre líneas:** Para máquinas polifásicas de corriente alterna, el promedio aritmético de la resistencia entre líneas a través de cada conjunto de terminales. Para máquinas trifásicas conectadas en Y, la resistencia de la fase es 0,5 veces la resistencia entre líneas. Para máquinas conectadas en  $\Delta$ , la resistencia de la fase es 1,5 veces la resistencia entre líneas [1].

**Tensión en terminales:** Para máquinas polifásicas de corriente alterna, el promedio aritmético de las tensiones entre línea [1].

## RESUMEN

Este trabajo de grado es una implementación de la norma técnica colombiana NTC 3477-2008 en uno de los motores de LabVolt™ y del grupo de trabajo 3 de motores de inducción trifásicos del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Tecnológica de Pereira, con lo cual y utilizando los métodos descritos en la norma se determina la eficiencia a partir de ensayos en el motor de inducción de rotor devanado disponible en el laboratorio y del mismo modo se determinan las pérdidas de forma separada mediante los mismos ensayos.

Con este proyecto se tiene una menor incertidumbre del estado de operación actual del motor de inducción de rotor devanado de LabVolt™, y grupo de trabajo 3 del laboratorio, conociendo de acuerdo a la norma cuales son las pérdidas fijas de dicha máquina en régimen nominal.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

En el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Tecnológica de Pereira se tienen diferentes tipos de máquinas, entre estas se incluye las de inducción de rotor devanado, las cuales debido al uso y a intervenciones de mantenimiento han podido sufrir una reducción de su vida útil o una disminución de su eficiencia nominal de fábrica. Además, el hecho de conocer la eficiencia y las pérdidas nominales de las máquinas permite tener una mayor certeza de los resultados y condiciones de carga óptimas para una adecuada implementación en el laboratorio.

Según [3], un motor de alta eficiencia tiene entre sus principales ventajas que normalmente son más robustos y mejor contruidos que los motores estándar, lo que se traduce en menores gastos de mantenimiento y mayor tiempo de vida. También, al tener una eficiencia mayor, se disminuye los costos de operación del motor y se puede recuperar la inversión adicional en un tiempo razonable, sobre todo si se opera a una carga cercana a la potencia nominal.

Por lo anteriormente enunciado, este proyecto se centra en la realización de los ensayos especificados en la norma NTC 3477-2008 [1], y apoyado en las normas NTC 5111-2002 [2] y NTC 2805-2005 [4], basándose en algunos de los datos de placa de dichas máquinas para obtener sus parámetros y de esta forma obtener un valor exacto de la eficiencia que pueden otorgar estas máquinas. Como complemento a las normas nacionales se presenta una revisión de los resultados basados en el estándar internacional IEEE Std 112-2004 [5], para procedimientos en máquinas asíncronas polifásicas.

### **1.2. MOTIVACIÓN**

Este proyecto se realiza bajo la necesidad de determinar los datos reales de eficiencia de las máquinas de rotor devanado que se encuentran en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Tecnológica de Pereira, bajo esta finalidad se hace una inspección para conocer cuál es el estado actual de una de las mismas y se sigue el procedimiento estipulado en la norma NTC 3477-2008 [1]. Esta norma describe paso a paso los procesos que se deben seguir para obtener la eficiencia actual de las máquinas y así poder compararla con los datos de placa.

Con este proyecto se busca beneficiar a los usuarios del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Tecnológica de Pereira, para un mejor desarrollo de las prácticas que se realizarán en dichas máquinas, pues se obtendrán valores más exactos en las diferentes pruebas a las que se sometan.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Determinar la eficiencia para el motor de inducción trifásico de rotor devanado utilizando la norma NTC 3477-2008.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Estudiar las principales características, el modo de operación, el funcionamiento, la obtención de parámetros y las aplicaciones de los motores de inducción polifásicos de rotor devanado.
- Realizar pruebas de determinación de pérdidas a los motores de inducción trifásicos de rotor devanado de LabVolt™ y del grupo de trabajo 3 del Laboratorio de Máquinas Eléctricas siguiendo el procedimiento establecido en la norma NTC 3477-2008.
- Realizar los cálculos de eficiencia de acuerdo a la norma NTC 3477-2008 y verificando la precisión de los datos con base en la NTC 2805-2005 para ensayos eléctricos en máquinas rotatorias.
- Analizar los resultados de las pruebas realizadas.

### **1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO**

El documento está dividido en cuatro capítulos que tienen como finalidad presentar de forma organizada la ejecución y análisis de cada una de las etapas del presente trabajo de grado. En el primer capítulo se presenta una introducción en la cual se realiza una presentación formal del presente documento.

En el segundo capítulo se realiza una conceptualización de los aspectos más importantes de la máquina polifásica de inducción, centrándose en el motor trifásico de rotor devanado y enfocado hacia la determinación de la eficiencia del mismo.

Luego, en el capítulo tres se presentan los ensayos realizados para la determinación de las pérdidas del motor de inducción trifásico de rotor devanado utilizando la norma técnica colombiana. Además se muestran los resultados de las pruebas realizadas, las pérdidas calculadas y el respectivo análisis de éstos.

Finalmente, en el cuarto capítulo se presentan las conclusiones generales y recomendaciones acerca del trabajo realizado.

## 2. ESTUDIO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO DE ROTOR DEVANADO

### 2.1. INTRODUCCIÓN

Las máquinas de inducción (MI) son las más utilizadas en la industria gracias a su robustez, mínimos o nulos requerimientos de mantenimiento y menores costos de operación ya que pueden operar directamente conectadas a la red eléctrica (frecuencia y tensión constante), permitiendo accionar cargas a una velocidad esencialmente constante. Cuando es utilizada 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.

En este capítulo se presenta un estudio general de la máquina de inducción trifásica, haciendo énfasis en la de rotor devanado para luego hacer un enfoque especial en lo que respecta a la eficiencia de esta máquina.

### 2.2. CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO

El circuito magnético de un motor de inducción trifásico está compuesto esencialmente por dos partes, la estacionaria y la móvil, las cuales respectan respectivamente al estator y el rotor. Estas partes están separadas por un pequeño entrehierro que va desde los 0.4 a los 4 mm dependiendo de la potencia de la máquina [6].

Las máquinas de inducción o asíncronas, constan fundamentalmente de los siguientes elementos:

- a) **Estator:** El estator representa una de las partes del circuito magnético del motor. El contenido de silicio, al igual que en los núcleos de los transformadores depende de las densidades de flujo y está constituido por paquetes de láminas troqueladas en forma de ranuras, para que el bobinado del estator pueda alojarse en dichas ranuras las cuales pueden considerarse, en forma análoga al transformador, como en el circuito primario. La forma de las ranuras varía de acuerdo con el tamaño o tipo del motor.
- b) **Rotor:** El rotor es un elemento de transferencia mecánica ya que de él depende la conversión de energía eléctrica a mecánica y viceversa. En forma análoga al transformador, el circuito del rotor es considerado como el secundario de la máquina. El rotor en las máquinas de inducción trifásicas puede ser de dos tipos:
  - Rotor en jaula de ardilla.

- Rotor devanado.
- c) **Carcasa:** La carcasa recibe también el nombre de soporte por ser el elemento que contiene el estator y los elementos auxiliares del motor.
- d) **Elementos auxiliares:** Los elementos auxiliares del motor de inducción son necesarios para el funcionamiento de éste y dependen del tipo del motor. Algunos de estos elementos son las tapas, chumaceras, tornillos de sujeción, caja de conexiones y base (soporte).

Para su funcionamiento, el motor de inducción se compone de un bobinado estatórico trifásico alimentado desde la red eléctrica y un circuito rotórico giratorio. Entre el estator y el rotor no existe ninguna conexión eléctrica. Las corrientes del rotor se inducen desde el estator a través del entrehierro. Tanto el estator como el rotor están fabricados de una lámina de núcleo altamente magnetizable que proporciona pérdidas por corrientes de Foucault e histéresis bajas.

El bobinado del estator está formado por tres bobinados individuales que se superponen y están desfasados entre sí  $120^\circ$  en el espacio. Cuando se conecta a la alimentación, la corriente de entrada primero magnetiza el estator. Esta corriente de magnetización genera un campo rotativo que gira con la velocidad de sincronismo, la cual se presenta en la ecuación (2.1).

$$n_s = \frac{60 \times f}{P} \quad (2.1)$$

Donde:  $n_s$  es la velocidad de sincronismo en rpm.

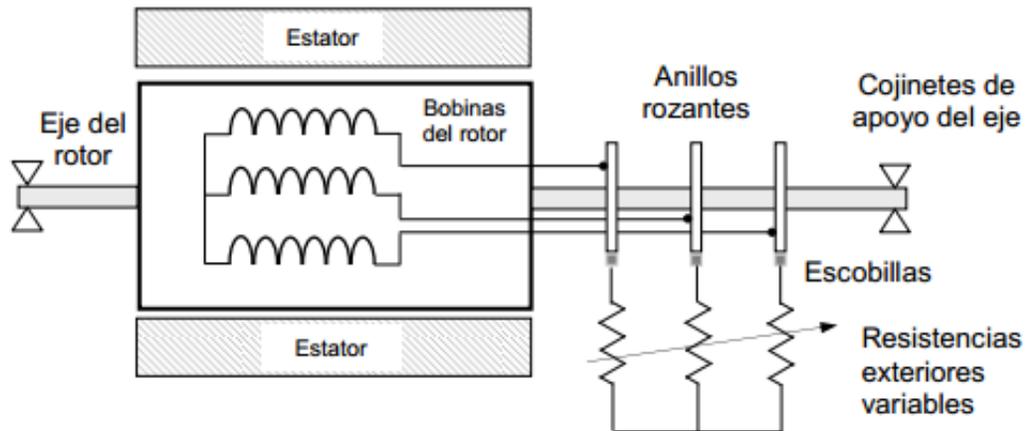
$f$  es la frecuencia de la red eléctrica en Hz.

$P$  es el número de pares de polos.

Para el caso del motor de rotor devanado, dicho bobinado está compuesto de un devanado polifásico similar al del estator y con el mismo número de polos que él. Los terminales del devanado del rotor se conectan a anillos rozantes aislados, montados sobre el eje, en los que se apoyan escobillas de carbón, de manera que dichos terminales resultan accesibles desde el exterior, como se observa en la Figura 1.

Para el motor de la Figura 1, se pueden realizar los mismos ensayos que para el motor de inducción de jaula de ardilla, pero considerando el elemento externo que cierra el circuito trifásico del rotor, es decir las resistencias variables.

Figura 1. Diagrama de conexión del motor asíncrono trifásico de rotor devanado.



Fuente: Informe sobre máquina de inducción trifásica [6].

Entonces, para la determinación de los parámetros de ésta máquina se realizan diferentes pruebas como son la de corriente continua, la de vacío o sin carga, la de rotor bloqueado y una prueba de cargabilidad, las cuales se presentan a continuación.

### 2.2.1. Ensayo de corriente continua

Cuando una bobina es alimentada con corriente continua, el circuito equivalente de la misma es solo una resistencia, es decir que cuando se alimenta una bobina con una señal continua, no hay presencia de enlaces de flujo que permitan la inducción de energía en otros elementos similares, por lo que a partir del conocimiento de la tensión en bornes de la bobina y la corriente que circula por ella, se determina la resistencia equivalente como la relación de estas magnitudes. Entonces, la prueba de corriente continua permite determinar la resistencia de los devanados presentes en la máquina de inducción a partir de los valores de tensión y corriente en CD.

### 2.2.2. Ensayo sin carga o de vacío

Idealmente en este ensayo interesa hacer girar al motor de inducción a la velocidad sincrónica para reducir el deslizamiento hasta cero ( $s = 0$ ), en tal caso y alimentando a tensión nominal, no se inducen tensiones en el rotor y no circula corriente por éste. Así la potencia que toma el motor corresponde a la requerida solamente para su magnetización. Para esta condición se mide la corriente de línea, la tensión en terminales y la potencia trifásica de vacío. Con estas mediciones y aplicando directamente las ecuaciones presentadas en [7], [8] e incluso las que se presentan en [9], se obtienen los parámetros de la rama de magnetización de la máquina.

### 2.2.3. Prueba de rotor bloqueado

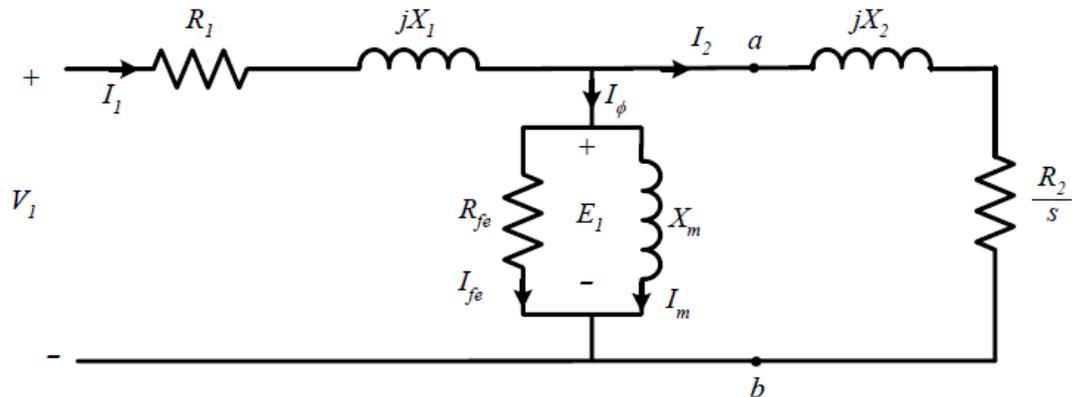
En este ensayo se evita o bloquea el movimiento del rotor ( $s = 1$ ), se aplica tensión reducida al motor hasta que circule la corriente nominal por el bobinado de estator y se obtiene la potencia necesaria para determinar los parámetros correspondientes a la rama de dispersión (estator y rotor) del circuito equivalente de la máquina. Para esta condición se mide la corriente nominal de línea, la tensión en terminales y la potencia trifásica de rotor bloqueado. Con estas mediciones y aplicando directamente las ecuaciones presentadas en [7], [8] e incluso las que se presentan en [9], se obtienen los parámetros de la rama de dispersión de la máquina.

#### 2.2.4. Prueba de cargabilidad

Es una prueba que se realiza en motores a tensión nominal y corriente reducida, y a medida que se le va aumentando la carga, la máquina va aumentando su valor de corriente de línea. Al momento en el que la corriente llega a sus valores nominales, se detiene el aumento de carga. Se debe ir tomando los valores de corriente constantemente para cada uno de los valores de carga.

En la Figura 2 se muestra el circuito equivalente por fase de la máquina trifásica de inducción operando como motor con sus respectivos parámetros.

Figura 2. Circuito equivalente por fase de una máquina de inducción trifásica.



Fuente: Informe sobre máquina de inducción trifásica [6].

Con estos ensayos, se puede parametrizar la máquina y así obtener de manera teórica la eficiencia de la misma para cada estado de carga. La eficiencia energética de un motor se define como la relación entre la potencia útil de salida y la potencia de entrada total, y normalmente se expresa en porcentaje, como se observa en la expresión (2.2).

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (2.2)$$

Donde:  $P_1$  es la potencia de entrada W.  
 $P_2$  es la potencia de salida en W.

En el caso de un motor, las potencias de entrada y salida corresponden a la potencia activa tomada de la red y a la potencia que se entrega en el eje, respectivamente. En caso de tratarse de la misma máquina operando como generador la relación de potencia es inversa, es decir que las potencias de entrada y salida corresponden a la potencia que se recibe en el eje y a la potencia activa que se entrega a la red, respectivamente.

### 2.3. EFICIENCIA DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Por definición, un motor con un número determinado de caballos de fuerza (*hp* por sus siglas en inglés) se espera que transmita esa cantidad de energía en forma mecánica en el eje del motor. Las pérdidas totales ( $P_T$ ) del motor son la diferencia entre la potencia de entrada y la de salida. Una vez se ha determinado la eficiencia del motor y se conoce la potencia de entrada, se puede calcular también la potencia de salida. De modo que la expresión (2.2) puede ser reescrita como se muestra en (2.3).

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_T} \times 100\% = \frac{P_1 - P_T}{P_1} \times 100\% \quad (2.3)$$

La mayoría de los análisis de ahorro de conservación de energía del motor asumen que el motor está operando a la eficiencia de su placa de características. Esta suposición es razonable por encima del 50% del punto de carga ya que el pico de eficiencia tiene lugar alrededor de 3/4 de la carga. Los motores de potencias más grandes exhiben una curva de eficiencia relativamente plana por debajo del 25% de plena carga [10].

Es más difícil determinar la eficiencia de un motor que ha estado en servicio durante un largo tiempo, más no es difícil que la placa se haya perdido y sea imposible localizar información de eficiencia. También el motor puede haber sido rebobinado, y es probable que la eficiencia se haya reducido.

Cuando no está disponible alguna información sobre la eficiencia, es posible determinarla operando en el punto de carga del motor. Esos datos se pueden determinar de la placa o buscando información técnica del motor.

Para motores pequeños, la eficiencia real, puede estar entre 80% y 90%, y en máquinas más grandes, su eficiencia puede estar entre el 60% y 65% [10].

En la norma [1] se pueden encontrar diferentes métodos para encontrar la eficiencia de un motor de éstos, teniendo en cuenta el tipo de instrumentos que se tengan

para su medida, su alimentación, frecuencia, y otros tipos de variables que pueden afectar el resultado de la eficiencia. Al igual, ésta dicta que se deben de hacer diferentes medidas en los diferentes circuitos del motor, para tener una mayor certeza de la proveniencia de las pérdidas.

### **3. PRUEBAS DE LABORATORIO Y DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA SEGÚN LA NTC 3477-2008**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

Para la determinación de la eficiencia del motor de inducción trifásico de rotor devanado es necesario tener en cuenta los diferentes apartes que aparecen en la norma NTC 3477-2008 [1], la cual se divide en diferentes pruebas, cada una busca calcular las pérdidas individuales del motor, con el fin de obtener la eficiencia total de la máquina.

#### **3.2. RESUMEN DE LA NORMA NTC 3477-2008: MEDIDAS EN VACÍO Y PRUEBAS DE CARGABILIDAD**

##### **3.2.1. Objetivos**

Determinar la eficiencia con cada una de las pruebas estipuladas en [1], para llegar a la conclusión final que será la eficiencia total de los motores a los cuales se les practicarán los diferentes análisis.

Así pues, se busca tener la eficiencia más cercana a la real, para hacer su respectiva comparativa con la idealización de los motores.

##### **3.2.2. Prueba en vacío**

Las pérdidas en vacío se deben estabilizar a frecuencia y tensión nominales. Teniendo en cuenta lo anterior, se deben realizar los siguientes ensayos:

###### **3.2.2.1. Pérdidas por fricción y ventilación**

Se desarrolla una curva de pérdidas fijas ( $P_k$ ) en función de la tensión al cuadrado ( $U_0^2$ ). Extrapole una línea recta hasta la tensión cero. La intersección con el eje de tensión cero constituye las pérdidas por fricción y ventilación ( $P_{fw}$ ).

###### **3.2.2.2. Pérdidas en el hierro**

A partir de los valores de la tensión entre 60% y 125% de la tensión nominal, se debe trazar una curva de las pérdidas en el hierro ( $P_{fe} = P_k - P_{fw}$ ) versus la tensión  $U_0$ . Las pérdidas en el hierro del punto de carga deseado se toman de la curva en la tensión  $U_r$ , la cual se presenta en la ecuación (3.1) y las cuales toman en consideración la caída de tensión resistiva en el devanado primario.

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \sin \varphi\right)^2} \quad (3.1)$$

Donde:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times I} \quad (3.2)$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \quad (3.3)$$

$U$ ,  $I$ ,  $P$  y  $R$  se indican en el numeral 6.4.4.2 de la NTC 3477-2008 [1].

Antes de iniciar el registro de los datos para este ensayo, la temperatura de los devanados debe estar en el rango de 5 K de la temperatura  $\theta_N$ , obtenida a partir de un ensayo de temperatura con carga nominal.

La máquina se debe cargar mediante los medios adecuados.

Aplice la carga a la máquina en 6 puntos de carga. Cuatro puntos de carga se deberían seleccionar de manera que tengan una separación aproximadamente igual entre no menos de 25% y hasta 100% de carga inclusive. Los dos puntos restantes de carga con separación aproximadamente igual se deben seleccionar de manera conveniente por encima de la carga de 100%, pero sin exceder una carga de 150%. Al aplicar la carga a la máquina, inicie con el valor de carga más alto y prosiga en orden descendente hasta la carga mínima. Estos ensayos se deben realizar lo más rápido posible para minimizar los cambios de temperatura en la máquina durante el proceso.

En máquinas de corriente alterna, la variación de la frecuencia entre todos los puntos debe ser inferior a 0,1%. Luego se mide el valor  $R$  antes de la lectura de carga máxima y después de la lectura de carga mínima. La resistencia para la carga de 100% y cargas superiores deben ser el valor que se determina antes de la lectura de la carga más alta. La resistencia utilizada para cargas inferiores a 100% se debe determinar entonces como lineal con la carga, utilizando la lectura antes del ensayo para la carga más alta y después de la carga más baja para 25% de carga. Para cada punto de carga se registra:  $U$ ,  $I$ ,  $P$ ,  $R$ ,  $n$ ,  $f$  y  $T$ .

### 3.2.2.3. Pérdidas fijas

Al restar las pérdidas del devanado en vacío (a la temperatura durante el ensayo en vacío) de la potencia de entrada en vacío se obtienen las pérdidas fijas que son la suma de las pérdidas por fricción, ventilación y del hierro, como se observa en la expresión (3.4).

$$P_k = P_0 - P_s = P_{fw} - P_{fe} \quad (3.4)$$

Donde:

$$P_s = 1.5 \times I_0^2 \times R_{110} \quad (3.5)$$

### 3.2.3. Prueba de rotor bloqueado

Para realizar esta prueba es necesario tener en cuenta que bloqueando el rotor y aplicando tensión reducida a frecuencia nominal ( $f = f_N$ ) a los terminales, el deslizamiento llegará a 1,0. Incrementando a su vez la tensión hasta que la corriente de línea sea igual a 1,5 veces la corriente nominal  $I_N$ .

Las ecuaciones (3.6) a la (3.11) fueron extraídas del numeral 7.4 de la norma NTC 5642-2008 [11].

Para el caso de la impedancia, al ser una conexión en delta, se utiliza la ecuación (3.6).

$$Z = \frac{U \times \sqrt{3}}{I} \quad (3.6)$$

Además, se tiene en cuenta que la fórmula para el factor de potencia es (3.7).

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{U \times I \times \sqrt{3}} \quad (3.7)$$

De aquí que para determinar la resistencia se puede aplicar la expresión (3.8) para determinar la resistencia.

$$R = Z \times \cos\varphi \quad (3.8)$$

La corriente del estator, al ser una conexión en delta, se hallará de la siguiente manera:

$$I_s = \frac{I}{\sqrt{3}} \quad (3.9)$$

La reactancia de dispersión total será:

$$X_{\sigma a} = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (3.10)$$

Y por último se determina la inductancia total del estator:

$$L_{ts} = \frac{X_{ts}}{2\pi \times f_N} \quad (3.11)$$

Los valores de  $P$ ,  $U$  e  $I$ , son tomados de las pruebas realizadas.

### 3.2.4. Prueba de cargabilidad.

En la prueba realizada, se hallaron diferentes valores de corriente  $I$ , hasta su valor de  $I_N$ , y a una tensión constante. Las potencias a hallar con esta prueba se pueden determinar mediante las mismas fórmulas que se utilizaron en la prueba de vacío, según se presenta en la NTC 3477-2008 [1]: Pérdidas por fricción y viento ( $P_{fw}$ ), pérdidas fijas ( $P_k$ ) y pérdidas en el hierro ( $P_{fe}$ ).

Para un resultado óptimo en las pruebas, se debe tener en cuenta la corrección de temperatura en las pérdidas del devanado en vacío, tomado del numeral 5.7.3 de la norma anteriormente dicha.

Los valores de la resistencia del devanado registrados durante el ensayo deben hacer referencia a una temperatura normal de referencia de 25°C. El factor de corrección para ajustar la resistencia del devanado (y el deslizamiento en el caso de máquinas de inducción de jaula) a una temperatura normal de referencia del refrigerante de 25°C se debe determinar aplicando la ecuación (3.12).

$$P_{s\phi} = \frac{235 + T_p + 25 - T_a}{235 + T_p} * P_s \quad (3.12)$$

Donde:  $T_p$ : Temperatura de la prueba.

$T_a$ : Temperatura ambiente.

La constante de temperatura de 235 es para el cobre, ésta se debería reemplazar por 225 para devanados de aluminio, de ser necesario.

Además, se deberá hallar las pérdidas en el devanado del rotor y aplicar la corrección por temperatura, éstas son utilizadas para las pérdidas no corregidas del devanado de rotor para cada uno de los puntos de carga teniendo en consideración el deslizamiento  $s$  en (4.14), por lo que se utiliza la ecuación (3.13).

$$P_r = (P_o - P_s - P_{fe}) \times s \quad (3.13)$$

Donde:

$$s = 1 - \frac{p \times n}{60 \times f} \quad (3.14)$$

Nota: Esta ecuación fue reformulada debido a que en la norma técnica se encuentra mal editada.

### 3.3. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE LABORATORIO

Tomando como base el capítulo 8.1 de la NTC 3477-2008 [1] para la realización de las pruebas anteriormente referenciadas, se toma las medidas con cada uno de los cálculos para obtener la eficiencia total de las máquinas cuyos datos de placa son los siguientes:

Tabla 1. Datos de placa de los motores a analizar.

Magnitudes	LabVolt™	General Electrics™
Tensión [V]	208	220
Corriente [A]	1,3	4,9
Potencia [W]	175	2237
Velocidad [rpm]	1500	1725
Frecuencia [Hz]	60	60

Aquí se presentan los resultados dados en los dos grupos de máquinas que se sometieron a las pruebas, en las tablas se dividen los resultados dados por las máquinas, tanto de tensión, corriente, potencia y sus respectivas pérdidas, todas mostradas cómo se hallan en el numeral anterior. Para una mayor claridad, se separan las tablas de los resultados por pruebas y por máquinas, el análisis de los resultados se expone en el siguiente aparte.

#### 3.3.1. Resultados en el motor de inducción de rotor devanado LabVolt™.

Para las pruebas en el grupo LabVolt™, inicialmente se tuvo en cuenta la temperatura del ambiente al momento de hacer las pruebas para efectuar la corrección de temperatura. Para cada una de las pruebas se tuvo un proceso diferente el cual se explica a continuación.

##### 3.3.1.1. Prueba de vacío

Como se contempló anteriormente, la prueba se debe realizar sin ningún tipo de oposición al movimiento del eje y a frecuencia nominal. Se tuvo que variar la tensión para tomar las diferentes muestras de potencia y corriente, para hallar las pérdidas con las ecuaciones ya mencionadas. En la Tabla 2 se presentan las temperaturas medidas después de realizada la prueba, considerando que antes de iniciar, la temperatura ambiente medida fue de 25°C. Para tener los valores de la temperatura, fue necesario utilizar una termocupla conectada al Multímetro Promax™, la cual, se puso entre los devanados del motor después de haber realizado la prueba para conocer su temperatura. Para conocer la medición en ambiente, se hace el mismo procedimiento pero en un espacio del laboratorio donde su temperatura no se vea afectado por ningún factor externo, tal como se muestra en la Figura 4.

Tabla 2. Temperaturas medidas en los devanados después de la prueba.

<b>Tamb [°C]</b>	<b>Tdev [°C]</b>
26.6	28.2

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en la Tabla 2 se observan los cambios presentados en cada una de las pérdidas a medida que se incrementa el valor de la magnitud de tensión a la entrada del motor.

Figura 4. Medición de la temperatura ambiente con el multímetro Promax.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Resultados de la prueba de vacío para el motor LabVolt™.

Potencia [W]	Corriente [A]	Tensión [V]	Ps [W]	Pfw [W]	U <sup>2</sup> [V <sup>2</sup> ]	Pk [W]	Pfe [W]
58	0,98	68,05	24,477	27,288	4630,80	33,523	6,235
47	0,78	75	15,506	27,288	5625	31,494	4,206
43	0,62	82	9,797	27,288	6724	33,203	5,915
41	0,6	87	9,175	27,288	7569	31,825	4,537
40	0,59	92	8,872	27,288	8464	31,128	3,840
40	0,52	100	6,892	27,288	10000	33,108	5,820
41	0,51	111	6,629	27,288	12321	34,371	7,083
41	0,51	120,5	6,629	27,288	14520,25	34,371	7,083
43	0,51	131,5	6,629	27,288	17292,25	36,371	9,083
43	0,52	138,5	6,892	27,288	19182,25	36,108	8,820
44	0,52	144	6,892	27,288	20736	37,108	9,820
47	0,58	132	8,574	27,288	17424	38,426	11,138
50	0,6	163	9,175	27,288	26569	40,825	13,537
55	0,62	177	9,797	27,288	31329	45,203	17,915
58	0,7	188	12,488	27,288	35344	45,512	18,224
67	0,8	207	16,311	27,288	42849	50,689	23,401

Fuente: Elaboración propia.

Como se había mencionado, para las pérdidas por fricción y ventilación, se debe hacer una extrapolación de una gráfica compuesta por los datos de  $U^2$  contra  $P_k$ , para valores de tensión inferiores al 50% de la tensión nominal, los cuales se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos para la extrapolación de la gráfica.

U <sup>2</sup> [V <sup>2</sup> ]	Pk [W]
4630,80	33,523
5625	31,494
6724	33,203
7569	31,825
8464	31,128

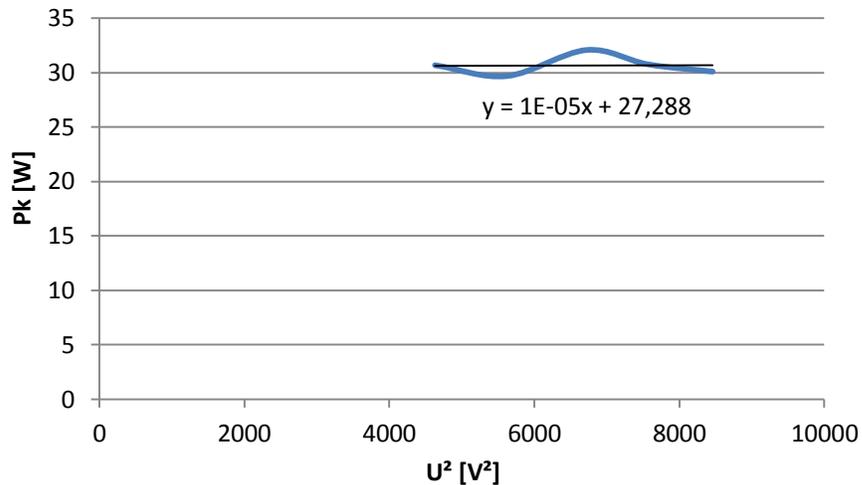
Fuente: Elaboración propia.

El valor de las pérdidas por fricción y viento ( $P_{fw}$ ), se obtienen a partir de la linealización de los datos obtenidos de la curva de la obtenida en la

Figura 3, llevando la tensión hasta cero. Teniendo la línea de tendencia de la curva, se obtienen los valores de la ecuación, sabiendo que será una línea recta, su ecuación característica se ve representada en la fórmula (3.15).

$$y = ax + b \quad (3.15)$$

Figura 3. Linealización de la curva para los valores de las pérdidas.



Fuente: Elaboración propia.

Siendo así, el valor de las pérdidas por fricción y ventilación lo representado en la Figura 3, es decir:

$$y = 10E - 05x + 27,288$$

Tomando como base la ecuación (3.15), se puede decir que el valor total de las pérdidas por fricción y ventilación, serán de 27,288[W].

La prueba de vacío es inicialmente un requisito exigido para determinar las pérdidas generalizadas del motor, tanto para los motores de LabVolt™, como para el motor de rotor devanado del grupo 3. Teniendo estos datos, se pudo realizar la determinación de las pérdidas por fricción y ventilación, ya que es necesario tener el valor que es constante, es decir es un valor que no varía dependiendo de la potencia de entrada, y debe ser determinado por la extrapolación de las pérdidas constantes (\$P\_k\$) contra la tensión al cuadrado (\$U^2\$), esto siguiendo lo estipulado en la norma. El valor de las pérdidas por fricción y ventilación (\$P\_{fw}\$) serán las mismas para la prueba de cargabilidad.

Figura 5. Conexión para el calentamiento de los devanados en LabVolt™.



Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio.

### 3.3.1.2. Prueba de cargabilidad.

Al igual que la prueba de vacío, ésta también se explicó anteriormente, y para la realización de la misma, se tuvo en cuenta que la tensión y la frecuencia deben ser constantes, y lo que varía es la carga que se le pone gradualmente a la máquina y de ahí se ven las reacciones de éste para determinar los resultados de las pruebas ya vistas.

Para determinar la eficiencia con respecto al par, se debe de tener en cuenta la ecuación (3.16).

$$\eta = \frac{Par * V * \frac{2\pi}{60}}{P_o} \quad (3.16)$$

Además, para este ensayo también se consideró la medición de la temperatura para realizar así la corrección del valor de la resistencia de los devanados empleando la ecuación (3.12) con lo solicitado en la NTC 3477-2008 [1]. Estas temperaturas se pueden observar en la Tabla 5. Las mediciones de temperatura se realizaron de la misma forma en la que se presentó en la prueba de vacío.

Tabla 5. Temperaturas en los devanados al terminar la prueba de cargabilidad.

Tamb [°C]	Tdev [°C]
25	48,3

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que esta máquina al ser sometida a carga presenta un incremento elevado de temperatura. Además, la resistencia corregida sea la que se muestra en la Tabla 6, y los datos de esta tabla corresponden a las resistencias obtenidas de la medición en los devanados tanto del rotor como del estator, siendo así, estos datos utilizados para el cálculo de las pérdidas presentadas en la Tabla 7. Cabe resaltar que los valores de las resistencias están dados en DC, teniendo en cuenta que fueron obtenidos directamente de los devanados del motor.

Tabla 6. Resistencias del motor de LabVolt™.

	<b>Rs</b> <b>[Ω]</b>	<b>Rr</b> <b>[Ω]</b>
Medición a T final	18,60	153,20
Corregida a 25°C	8,54	69,84

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se presentan en la Tabla 7 los resultados de la prueba de cargabilidad.

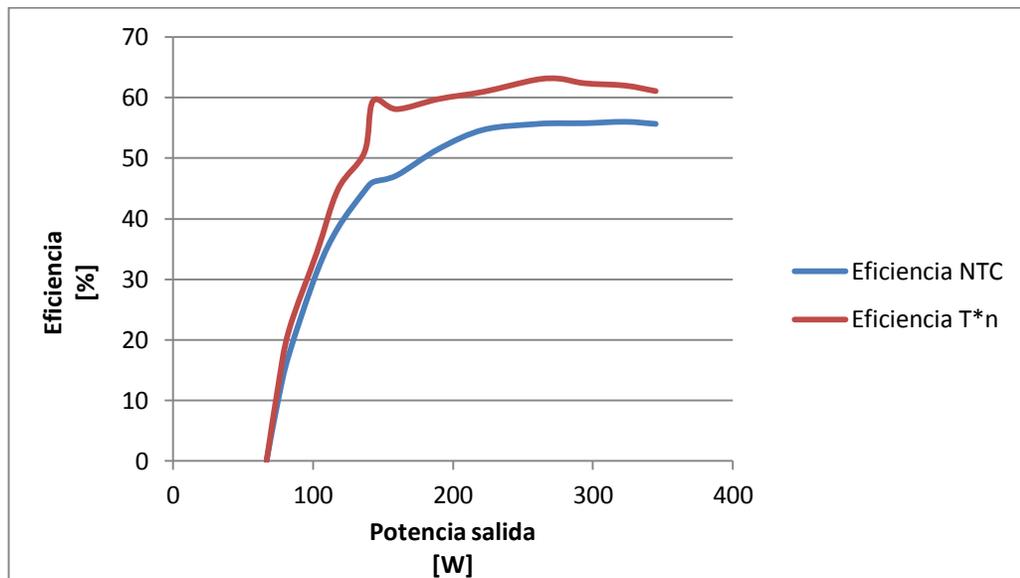
Tabla 7. Resultados prueba de cargabilidad en LabVolt™.

Corriente [A]	Potencia [W]	Velocidad [rpm]	Par [N]	Pk [W]	Ps [W]	Ps <sub>φ</sub> [W]	s	Pfe [W]	Pr [W]	Pll [W]	Pt [W]	Eficiencia NTC	Eficiencia T*n
0,75	67	1729	0,00	52,597	14,403	14,403	0,039	22,363	1,193	1,675	66,921	0,001	0,000
0,75	75	1719	0,05	52,597	14,403	14,403	0,045	22,363	1,721	1,875	67,649	0,098	0,120
0,75	83	1713	0,10	52,597	14,403	14,403	0,048	22,363	2,235	2,075	68,363	0,176	0,216
0,76	103	1697	0,20	52,210	14,790	14,790	0,057	22,363	3,768	2,575	70,783	0,313	0,345
0,76	118	1685	0,30	52,210	14,790	14,790	0,064	22,363	5,165	2,950	72,556	0,385	0,449
0,78	137	1669	0,40	51,422	15,578	15,578	0,073	22,363	7,209	3,425	75,863	0,446	0,510
0,78	143	1657	0,49	51,422	15,578	15,578	0,079	22,363	8,346	3,575	77,150	0,460	0,595
0,90	160	1644	0,54	46,260	20,740	20,740	0,087	22,363	10,131	4,000	84,522	0,472	0,581
0,95	190	1619	0,67	43,891	23,109	23,109	0,101	22,363	14,533	4,750	92,043	0,516	0,598
1,00	222	1596	0,81	41,395	25,605	25,605	0,113	22,363	19,724	5,550	100,530	0,547	0,610
1,10	259	1557	1,00	36,018	30,982	30,982	0,135	22,363	27,763	6,475	114,872	0,556	0,630
1,15	276	1541	1,08	33,137	33,863	33,863	0,144	22,363	31,623	6,900	122,037	0,558	0,631
1,20	294	1523	1,15	30,128	36,872	36,872	0,154	22,363	36,128	7,350	130,000	0,558	0,624
1,25	323	1494	1,28	26,992	40,008	40,008	0,170	22,363	44,307	8,075	142,041	0,560	0,620
1,30	345	1469	1,37	23,727	43,273	43,273	0,184	22,363	51,372	8,625	152,921	0,557	0,611

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6, se expone la comparación gráfica entre las eficiencias calculadas, siendo la eficiencia NTC la hallada por el método expuesto en la norma, y la eficiencia T\*n, aquellas que se calcularon por el método convencional, hay que tener en cuenta que la expresada en la norma tiene un menor pico de eficiencia, a su vez que su estabilización es mucho menor que la otra.

Figura 6. Comparación eficiencias calculadas.



Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de la medida en vacío, aquí se tuvo en cuenta la corriente máxima soportada por el motor, ya que se inicia con cargas menores y va aumentando a medida que se va subiendo el par en el motor, la potencia empieza a aumentar de manera paulatina, hasta que la corriente sea la máxima soportada, teniendo en cuenta esto, la eficiencia se vuelve constante en cierto momento de la carga, para después de cierto esfuerzo bajar de manera gradual la eficiencia, siendo así la máxima eficiencia es del 56.3% para un par de 1.28, y una potencia de salida de 323W, siendo ésta la potencia con la que la máquina tendrá una mayor eficiencia.

### 3.3.2. Resultados en el motor de inducción de rotor devanado del grupo de trabajo 3.

En el motor de inducción trifásico del grupo de trabajo 3 se repite el mismo procedimiento realizado anteriormente en el grupo de LabVolt™ del laboratorio de máquinas, repitiendo las mismas pruebas paso a paso como lo indica la norma NTC 3477-2008 [1].

#### 3.3.2.1. Prueba de vacío.

Los resultados obtenidos se contemplan en la Tabla 8 siguiendo el procedimiento sugerido en la norma.

Tabla 8. Resultados en la prueba de vacío para el motor del grupo 3.

Potencia [W]	Corriente [A]	Tensión [V]	Ps [W]	Pfw [W]	U <sup>2</sup> [V <sup>2</sup> ]	Pk [W]	Pfe [W]
540	5,4	206	65,61	251,020	42436	474,39	223,370
510	5,1	193	58,52	251,020	37249	451,48	200,458
470	4,8	182,7	51,84	251,020	33379,29	418,16	167,140
430	4,3	162	41,60	251,020	26244	388,40	137,378
380	3,8	136,9	32,49	251,020	18741,61	347,51	96,490
370	3,6	128,5	29,16	251,020	16512,25	340,84	89,820
360	3,4	117,3	26,01	251,020	13759,29	333,99	82,970
340	3,3	107,9	24,50	251,020	11642,41	315,50	64,478
320	3,1	96,1	22,04	251,020	9235,21	297,96	46,937
300	3,0	80,3	20,25	251,020	6448,09	279,75	28,730
290	3,0	70,56	20,25	251,020	4978,7136	269,75	18,730
250	3,0	57,2	20,25	251,020	3271,84	229,75	-21,270

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo con el procedimiento, se muestrea la temperatura para evitar que las mediciones obtenidas en todos los ensayos se salgan de un rango determinado. En la Tabla 9 se muestran los valores de temperatura al interior de la máquina para la prueba de vacío. Las temperaturas de hallaron por el mismo método mostrado en los motores de LabVolt™ (mostrados anteriormente).

Tabla 9. Temperatura durante la prueba en vacío.

Tamb [°C]	Tdev [°C]
25	38

Fuente: Elaboración propia.

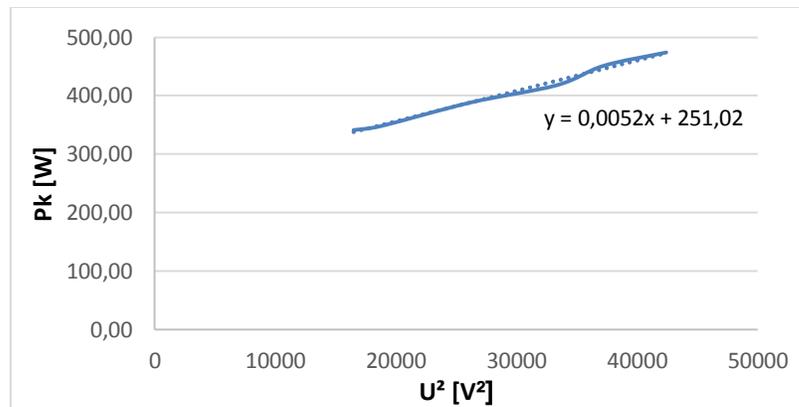
Tal como en las pruebas realizadas al motor de LabVolt™, se debe realizar la extrapolación de la Figura para determinar las pérdidas por fricción y viento, y para ello se toman los datos del cuadrado de la tensión de alimentación y las pérdidas  $P_k$  por encima del 50% de la tensión nominal, los cuales se presentan en la Tabla 9.

Tabla 10. Datos para la extrapolación de la gráfica.

$U^2$ [V <sup>2</sup> ]	$P_k$ [W]
16512,25	340,84
18741,61	347,51
26244	388,40
33379,29	418,16
37249	451,48
42436	474,39

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Extrapolación de los datos para el motor del grupo 3.



Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el anterior grupo de motores se ha realizado exactamente el mismo procedimiento, siendo así, las pérdidas serán utilizadas para la determinación de la eficiencia del motor. Es de tener en cuenta que las dimensiones son algo mayores a lo visto en la máquina anteriormente testeada.

Teniendo en cuenta la ecuación (3.15), se puede determinar que las pérdidas por fricción y ventilación serán 251,02[W].

### 3.3.2.2. Prueba de cargabilidad.

Para la prueba de cargabilidad se tiene como base los mismos criterios empleados en el anterior motor, ya que no difiere en nada el procedimiento. Cabe recordar que en esta prueba se utilizaron como carga bombillas incandescentes, determinando de este modo los diferentes datos.

Tabla 11. Temperatura después de la prueba de cargabilidad.

<b>Tamb</b> <b>[°C]</b>	<b>Tdev</b> <b>[°C]</b>
25	44

Fuente: Elaboración propia.

Los datos de temperatura de la Tabla 11 fueron obtenidos por medio del mismo procedimiento mostrado anteriormente, es decir, por medio de la termocupla asociada al multímetro Promax™. Al igual, sirven para analizar los datos obtenidos por medio de la prueba de cargabilidad, siendo esta la prueba para determinar la eficiencia del motor. Es de resaltar que ante la ausencia de un medidor de torque (torquímetro) en el almacén del Laboratorio de Máquinas de la Universidad Tecnológica de Pereira, se tuvo que omitir la medida del torque, teniendo así la ausencia de la determinación de la eficiencia obtenida por medio del método descrito en la ecuación (4.4), así que la comparación entre la eficiencia determinada por el método expuesto en la norma (ver Tabla 12) y el obtenido por la expresión ya referenciada, no será posible.

Tabla 12. Resultados prueba de cargabilidad Grupo 3.

<b>Corriente</b> <b>[A]</b>	<b>Potencia</b> <b>[W]</b>	<b>Velocidad</b> <b>[rpm]</b>	<b>P<sub>k</sub></b> <b>[W]</b>	<b>P<sub>s</sub></b> <b>[W]</b>	<b>P<sub>sφ</sub></b> <b>[W]</b>	<b>s</b>	<b>P<sub>fw</sub></b> <b>[W]</b>	<b>P<sub>fe</sub></b> <b>[W]</b>	<b>P<sub>r</sub></b> <b>[W]</b>	<b>P<sub>II</sub></b> <b>[W]</b>	<b>P<sub>t</sub></b> <b>[W]</b>	<b>Eficiencia</b> <b>NTC</b>
6,4	960	1773	916,3541	43,6459	43,6459	0,0150	251,02	139,490	11,6530	24,000	469,8089	0,5106
6,5	980	1770	934,9795	45,0205	45,0205	0,0167	251,02	139,490	13,2582	24,500	473,2887	0,5171
6,5	990	1767	944,9795	45,0205	45,0205	0,0183	251,02	139,490	14,7673	24,750	475,0478	0,5202
6,6	1113	1765	1066,5836	46,4164	46,4164	0,0194	251,02	139,490	18,0268	27,825	482,7782	0,5662
6,8	1230	1757	1180,7279	49,2721	49,2721	0,0239	251,02	139,490	24,8740	30,750	495,4061	0,5972
7,0	1420	1737	1367,7869	52,2131	52,2131	0,0350	251,02	139,490	42,9904	35,500	521,2135	0,6329
7,4	1660	1747	1601,6492	58,3508	58,3508	0,0294	251,02	139,490	43,0525	41,500	533,4133	0,6787
7,8	1760	1740	1695,1705	64,8295	64,8295	0,0333	251,02	139,490	51,8560	44,000	551,1955	0,6868

Fuente: Elaboración propia.

Cabe recordar que no fue posible obtener más datos para la determinación de la eficiencia ya que sólo se tenían las bombillas incandescentes de dos tableros disponibles para medir la eficiencia del motor. La razón por la que fueron usadas las bombillas fue aclarada anteriormente.

Es de notar que la mayor eficiencia se encuentra con la potencia casi nominal de la máquina, al igual que su velocidad, siendo así, su máxima eficiencia del 69%, una cifra que no es muy buena para una máquina de la potencia que maneja, pero al igual que con la anterior prueba, no supera las expectativas que debería tener el motor, es de recordar que el motor no podrá tener una mayor salida de potencia, ya que su corriente nominal es la mayor obtenida por el regulador. Su potencia no debe ser mayor a 1760W, ya que para el uso correcto de la misma, debe de ser su mayor valor.

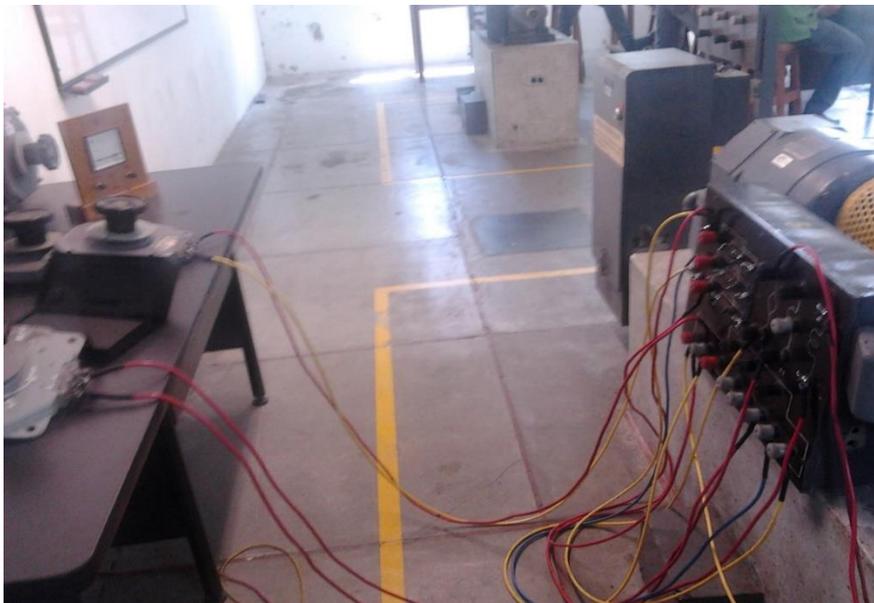
Tabla 13. Resistencia del motor en la prueba de cargabilidad.

	<b>Rs</b> <b>[<math>\Omega</math>]</b>	<b>Rr</b> <b>[<math>\Omega</math>]</b>
Medición a T final	0,75	92,80
Corregida a 25°C	0,36	43,95

Fuente: Elaboración propia.

Los datos de las resistencias mostrados en la Tabla 13, fueron obtenidos por medio de la medición con un multímetro Fluke™ en los devanados del motor, siendo necesarios para la medición de las pérdidas. Cabe resaltar que al igual que los anteriores valores de resistencia, están expresados en corriente directa (DC).

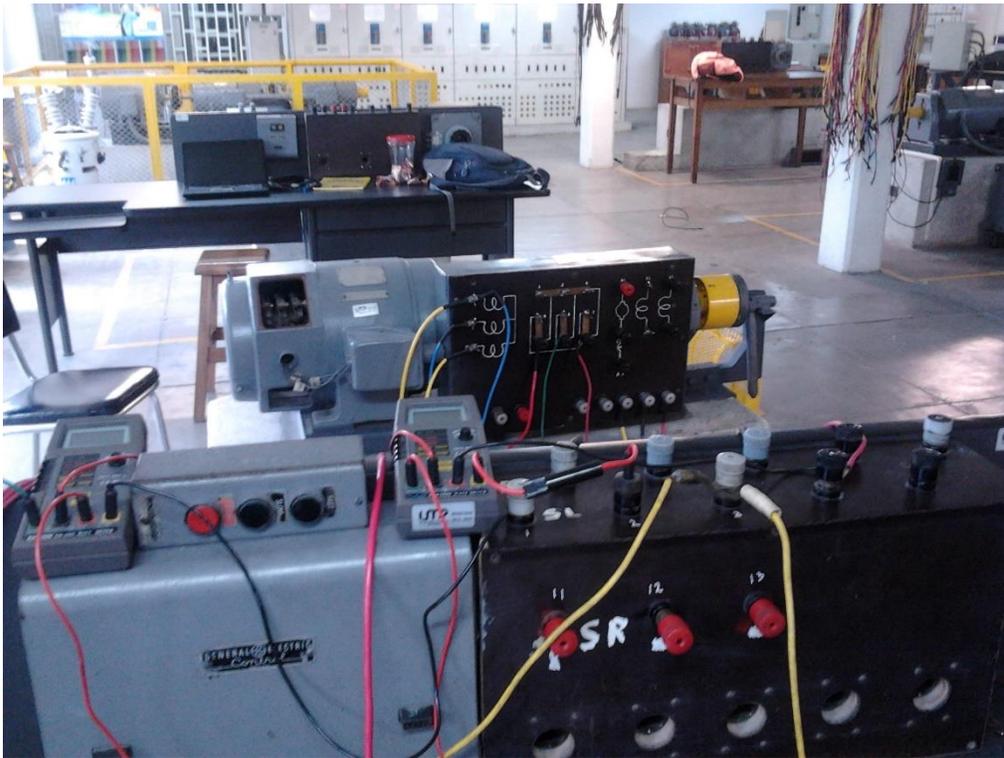
Figura 8. Conexión del regulador de tensión al motor.



Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio.

Para suministrar la tensión de alimentación al motor fue necesario tener un generador y una conexión con reóstatos para limitar el suministro de corriente al motor (Figura ), a modo de control, se utilizaron dos reóstatos para tener un mayor rango de tensión, siendo así las medidas de tensión un poco diferenciadas las unas de las otras (Figura ), además, fue útil para mantener en la tensión y la velocidad nominal al motor. Éste mismo proceso fue utilizado para la prueba de vacío.

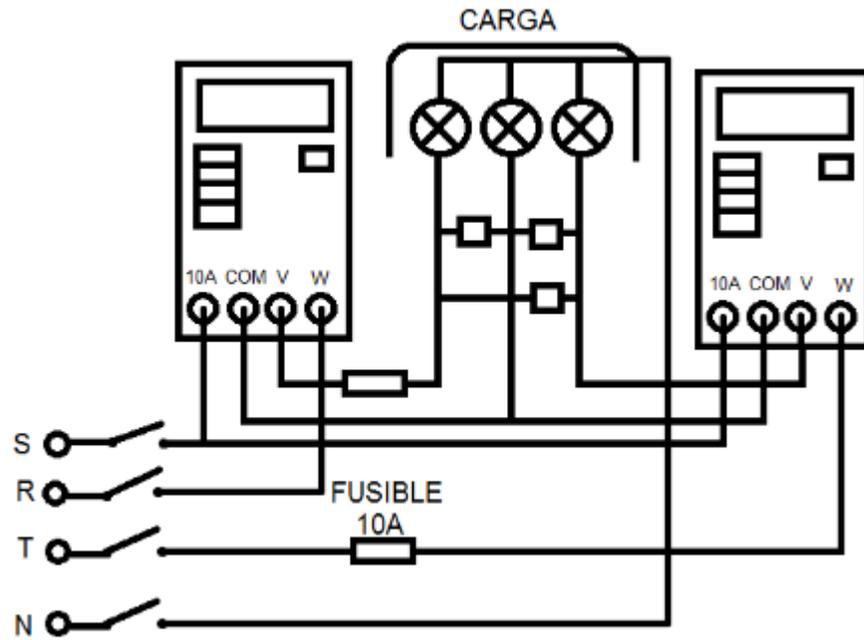
Figura 9. Conexión de los medidores al motor.



Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio.

El esquema de conexiones de la fuente a la máquina fue la misma que se usa para el método de los dos vatímetros (ver Figura 10).

Figura 10. Método de los dos vatímetros.



Fuente: Elaboración propia.

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1. CONCLUSIONES GENERALES**

De acuerdo a las pruebas realizadas siguiendo lo descrito en la norma NTC 3477-2008 para la determinación de la eficiencia de las máquinas de inducción de rotor devanado con su respectivo análisis de resultados planteados anteriormente es de notar una gran pérdida de eficiencia llegando en el peor de los casos por debajo del 50% trabajando a régimen nominal, que es de suponer debido a que son máquinas que llevan larga instancia en la universidad y se nota su deterioro tanto mecánico como eléctrico presentando en muchas ocasiones problemas para arrancar.

Hay que tener en cuenta que el laboratorio es utilizado a diario por estudiantes de ingeniería y tecnología eléctrica por lo tanto se puede presentar un mal uso ayudando esto a deteriorar más su funcionamiento llevando a que los resultados obtenidos cuando se desarrolla una guía de trabajo correspondiente al laboratorio de máquinas eléctricas sean muy diferentes a los datos teóricos.

Al momento de realizar las pruebas siguiendo los lineamientos que dicta la norma se puede observar que el motor presenta un comportamiento más balanceado y se evita que se tengan sobretensiones y de esta forma se tiene un mejor control sobre las pruebas realizadas.

Algunas pruebas en los motores del grupo 3 fueron bastante complicadas ya que los implementos utilizados estaban bastante obsoletos y descuidados llegando al punto de arreglarlos para ejecutar las pruebas y obligándonos a hacer arreglos bastante complicados y peligrosos.

### **4.2. RECOMENDACIONES**

Para el desarrollo de las prácticas, era necesario contar primero que todo con un torquímetro para hacer las respectivas mediciones en las máquinas del grupo 3, el cual debería ser proveído por el Almacén.

Las máquinas por su uso, su mantenimiento y los constantes sobre esfuerzos a los que están expuestos, se recomienda que se cumpla con las condiciones de placa que especifica el fabricante, ya que a medida que han pasado los años, su eficiencia se ha visto muy afectada y de seguir con este modo de operación, su eficiencia bajará a niveles críticos.

Para alimentar los motores del grupo 3 se recomienda que haya equipos adecuados para facilitar la alimentación de estos, ya que los equipos de los que se dispone actualmente en el laboratorio para tener un control de la tensión se hacen

complicados y peligrosos debido a los arreglos que se le hacen con el fin de lograr el cometido.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN, Máquinas eléctricas rotatorias. Métodos para la determinación de las pérdidas y de la eficiencia a partir de ensayos. NTC-3477, Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)., 2008, pp. 1-54.
- [2] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN, Eficiencia energética en motores eléctricos. método de ensayo para medir la eficiencia. tecnología americana. NTC-5111, Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2002.
- [3] Unidad de Planeamiento Minero Energética; Colciencias; Universidad del Atlántico; Universidad Autónoma de Occidente, «Sistema de Información de Eficiencia Energética y Energías Alternativas,» [En línea]. Available: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/motores.pdf>. [Último acceso: 20 01 2014].
- [4] INSTITUTO COLOMBIANO DE CERTIFICACIÓN Y NORMALIZACIÓN, Máquinas eléctricas rotatorias. Características nominales y características de funcionamiento. NTC-2805, Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2005.
- [5] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE Std 112, New York City: Power Engineering Society (PES), 2004, pp. 1-79.
- [6] J. A. TAPIA, «Máquina de inducción trifásica,» Universidad de Pamplona, Pamplona - España, 2008.
- [7] B. S. GURU y H. R. HIZIRUGLU, Máquinas Eléctricas y Transformadores, 3 Ed ed., México: Oxford University Press, 2003.
- [8] S. J. CHAPMAN, Máquinas Eléctricas, 4 Ed ed., España: McGraw-Hill, 2005.
- [9] A. R. HERRERA y J. A. ORJUELA, Determinación de los parámetros del motor de inducción utilizando un algoritmo de optimización por cúmulo de partículas, Pereira: Proyecto de grado de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, 2010.
- [10] Todoproductividad Industria y Empresa, «Todoproductividad,» 04 01 2011. [En línea]. Available: <http://todoproductividad.blogspot.com/2011/01/determinando-eficiencia-y-carga-de-los.html>. [Último acceso: 15 11 2013].
- [11] INSTITUTO COLOMBIANO DE CERTIFICACIÓN Y NORMALIZACIÓN, Máquinas eléctricas rotatorias. Métodos de ensayo para determinar las magnitudes de los parámetros de los circuitos equivalentes para motores de

inducción de jaula de ardilla trifásicos de baja tensión. NTC 5642, Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2008.

- [12] A. ESCOBAR, F. A. OCAMPO y M. HOLGUÍN, Estimación de parámetros de motor de inducción a partir de los datos del fabricante, Vols. %1 de %22, No 39, Pereira: Revista Scientia et Technica, Universidad Tecnológica de Pereira, 2008, pp. 78-82.
- [13] S. CARREÑO, Estudio de los datos del catálogo en motores de inducción trifásicos., Cataluña: Proyecto de grado de Maestría, Departament d'Enginyeria Eléctrica, Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.
- [14] V. B. GanttProject, *Software para la elaboracion de proyectos y mantenimiento*, 2013.
- [15] WIKIPEDIA, «Wikipedia, The free Encyclopedia,» 28 10 2012. [En línea]. Available: <<http://en.wikipedia.org/wiki/>>. [Último acceso: 03 12 2013].
- [16] Motores eléctricos, «[www.mcgraw-hill.es](http://www.mcgraw-hill.es),» [En línea]. Available: <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448173104>.. [Último acceso: 21 03 2013].
- [17] J. Carrascosa, D. Gil Pérez y A. Vilches, «Papel de la actividad experimental en la educación científica,» Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas Cuba, 2006. [En línea]. Available: <http://www.fsc.ufsc.br/cbef/port/23-2/artpdf/a1.pdf>. [Último acceso: 10 03 2013].