

**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL MOTOR DE INDUCCIÓN
TRIFÁSICO DE JAULA DE ARDILLA CON LA NORMA NTC 5642-2008**

ANDRÉS FELIPE RINCÓN DAVID

ALEXANDER OSPINA JARAMILLO

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2013**

**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL MOTOR DE INDUCCIÓN
TRIFÁSICO DE JAULA DE ARDILLA CON LA NORMA NTC 5642-2008**

ANDRÉS FELIPE RINCÓN DAVID

ALEXANDER OSPINA JARAMILLO

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

**Director
M.Sc. Andrés Felipe Panesso Hernández
Profesor Auxiliar**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2013**

Nota de aceptación:

Director
Ingeniero Electricista M.Sc.
Andrés Felipe Panesso Hernández

Jurado
Ingeniero Electricista Ph.D.
Carlos Julio Zapata Grisales

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

Pereira, Diciembre de 2013

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

Andrés Felipe Rincón

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a Dios, a mi familia, a mi padre, madre y hermanos, y cada una de las personas que han vivido conmigo la realización de este trabajo de grado, al profesor Andrés Felipe Panesso, gracias por su colaboración, entrega y paciencia, de todo corazón les agradezco a todos el haberme brindado todo el apoyo, ánimo, pero sobre todo el cariño y la amistad mil gracias.

Andrés Felipe Rincón

Para el presente trabajo de grado, primero quiero agradecer a Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado. A la Universidad Tecnológica de Pereira por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional. A mi director de proyecto, Andrés Panesso por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado que hoy estemos aquí. Agradezco a mis padres y a mis hermanos por darme todo su apoyo. También me gustaría agradecer a mis profesores durante toda mi carrera porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación.

Alexander Ospina

CONTENIDO

	pág.
CONTENIDO	6
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE FIGURAS	9
RESUMEN.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Definición del problema	11
1.2. Motivación	11
1.3. Objetivos.....	12
1.3.1. Objetivo general	12
1.3.2. Objetivos específicos	12
1.4. Estructura del documento.....	12
2. ESTUDIO DEL MOTOR POLIFÁSICO DE INDUCCIÓN.....	13
2.1. Introducción	13
2.2. Generalidades del motor de inducción trifásico	13
2.3. Principio de funcionamiento.....	14
2.4. Particularidades del motor de inducción	16
2.4.1. Características en vacío y a rotor bloqueado	16
2.4.5. Circuito equivalente del motor de inducción trifásico.....	17
3. PARAMETRIZACIÓN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO EN JAULA DE ARDILLA IMPLEMENTANDO LA GUÍA DE LABORATORIO DE MÁQUINAS.....	19
3.1. Introducción	19
3.2. Resumen de la guía de laboratorio de máquinas eléctricas: características con carga, pruebas sin carga y de rotor bloqueado, parámetros	19
3.3. Cálculo de los parámetros del motor de inducción	23
3.3.1. Motor de jaula de ardilla de 4 polos de LabVolt™	23
4. PARAMETRIZACIÓN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO EN JAULA DE ARDILLA IMPLEMENTANDO LA NORMA NTC 5642-2008.....	32
4.1. Introducción	32
4.2. Resumen de la NTC 5642-2008: 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	32
4.2.2. Requisitos para hacer la práctica	32
4.2.3. Medición de la resistencia entre líneas del estator, en CD.....	34
4.2.4. Determinación de los parámetros del circuito equivalente de los motores.....	34
4.2.5. Resistencia del devanado del estator R_s	35
4.2.6. Resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro R_{fe}	35
4.2.7. Inductancia total del estator $L_{ts} = L_m + L_s$	36
4.2.8. Inductancia de dispersión total L_σ	36
4.2.9. Corrección del desplazamiento de corriente	37

4.2.10. Inductancia magnetizante L_m y tensión U_m	38
4.2.11. Inductancia de dispersión del rotor y del estator L_s y L'_r	38
4.2.12. Inductancia para cálculos a flujo constante (carga nominal)	38
4.2.13. Resistencia de la jaula del rotor R'_r referida al devanado del estator	39
4.3. Cálculo de los parámetros del motor de inducción	41
4.3.1. Motor de jaula de ardilla de 4 polos de LabVolt™	41
4.4. Análisis comparativo de los resultados.....	51
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
5.1. Conclusiones generales	53
5.2. Recomendaciones	53
6. BIBLIOGRAFÍA.....	54

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Distribución empírica de X_{eq} de acuerdo al diseño del motor.....	21
Tabla 2. Medidas de la prueba de corriente directa para el motor de LabVolt™	23
Tabla 3. Resistencia de los devanados estatóricos del motor de LabVolt™	24
Tabla 4. Medidas de la prueba de rotor bloqueado para el motor de LabVolt™	24
Tabla 5. Impedancias equivalentes calculadas para el motor de LabVolt™	24
Tabla 6. Medidas de la prueba de vacío para el motor de LabVolt™	25
Tabla 7. Parámetros calculados para la rama de excitación del motor de LabVolt™.26	26
Tabla 8. Medidas de la prueba de corriente directa para el motor del grupo 4.	28
Tabla 9. Resistencia de los devanados estatóricos del motor del grupo 4.....	28
Tabla 10. Medidas de la prueba de rotor bloqueado para el motor del grupo 4.....	29
Tabla 11. Impedancias equivalentes calculadas para el motor del grupo 4.	30
Tabla 12. Medidas de la prueba de vacío para el motor del grupo 4.	30
Tabla 13. Parámetros calculados para la rama de excitación del motor del grupo 4.31	31
Tabla 14. Mediciones de los devanados del motor de LabVolt™ en CD.	41
Tabla 15. Mediciones de la prueba de vacío para el motor de LabVolt™	42
Tabla 16. Mediciones de la prueba de rotor bloqueado para el motor de LabVolt™. 43	43
Tabla 17. Parámetros calculados usando los valores de la Tabla 15.	44
Tabla 18. Parámetros calculados usando los valores de la Tabla 16.	44
Tabla 19. Parámetros de dispersión a partir de los datos de la Tabla 16.	45
Tabla 20. Corrección de los parámetros calculados en la Tabla 18 y Tabla 19.	46
Tabla 21. Resultados de los cálculos siguiendo el procedimiento 7.8 de la norma. .	46
Tabla 22. Resultados de los cálculos siguiendo el procedimiento 7.9 de la norma. .	46
Tabla 23. Mediciones de los devanados del motor del grupo 4 en CD.	47
Tabla 24. Mediciones de la prueba de vacío para el motor del grupo 4.....	47
Tabla 25. Mediciones de la prueba de rotor bloqueado para el motor del grupo 4. ..	48
Tabla 26. Parámetros calculados usando los valores de la Tabla 24.	48
Tabla 27. Parámetros calculados usando los valores de la Tabla 25.	49
Tabla 28. Parámetros de dispersión a partir de los datos de la Tabla 25.	49
Tabla 29. Corrección de los parámetros calculados en la Tabla 27 y Tabla 28.	49
Tabla 30. Resultados de los cálculos siguiendo el procedimiento 7.8 de la norma. .	50
Tabla 31. Resultados de los cálculos siguiendo el procedimiento 7.9 de la norma. .	51
Tabla 32. Comparación porcentual de los parámetros para el motor de LabVolt™ ..	51
Tabla 33. Comparación porcentual de los parámetros para el motor del grupo 4.....	52

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Circuito equivalente por fase del motor de inducción polifásico.....	17
Figura 2. Prueba de rotor bloqueado del motor de inducción trifásico.	21
Figura 3. Motor de inducción trifásico en vacío.....	21
Figura 4. Motor de inducción trifásico con carga.....	22
Figura 5. Motor de jaula de ardilla de 4 polos de LabVolt™	23
Figura 6. Análisis de fasores para medición del ángulo de desfase entre las corrientes.	27
Figura 7. Visualización de las señales de corriente de alimentación del motor de inducción de LabVolt™	27
Figura 8. Placa de características del motor de inducción del grupo 4.	28
Figura 9. Corriente de alimentación utilizando la pinza voltiamperimétrica.....	29
Figura 10. Obtención del desfase empleando un osciloscopio.	31
Figura 11. Circuito equivalente Tipo T.	34
Figura 12. Circuito equivalente Tipo T (sin tener en cuenta las pérdidas en el hierro).	34
Figura 13. Circuito equivalente Tipo L (sin tener en cuenta las pérdidas en el hierro).	35
Figura 14. Realización de la prueba sin carga del motor del grupo 4.	42
Figura 15. Encendido del motor del grupo 5.	43
Figura 16. Curvas para la interpolación y extrapolación de valores según la norma para el motor de LabVolt™	45
Figura 17. Curvas para la interpolación y extrapolación de valores según la norma para el motor del grupo 4.....	50

RESUMEN

En este trabajo se realiza una implementación de la norma NTC 5642-2008 en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Tecnológica de Pereira, haciendo una comparación de los resultados obtenidos aplicando dicha norma con respecto a la guía de trabajo que se utiliza en la asignatura Laboratorio de Máquinas del Programa de Tecnología Eléctrica para determinar los parámetros del motor de inducción trifásico de jaula de ardilla.

El objetivo de esta comparación entre la norma NTC 5642-2008 y la guía de laboratorio actual, es lograr que al realizar las pruebas en la práctica de laboratorio, los resultados sean más confiables al momento de determinar los parámetros de dicho motor, es decir, contar con un punto de referencia más preciso.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Definición del problema

En el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Tecnológica de Pereira, se realizan procedimientos y prácticas basadas en textos académicos tales como las referencias bibliográficas [1] y [2]. Estos procedimientos son sencillos de implementar y permiten obtener el circuito equivalente de la máquina de inducción de forma aproximada. Para verificar la exactitud de los ensayos propuestos en los textos académicos se pretende emplear la norma técnica colombiana NTC 5642-2008 [3] y así mejorar los ensayos que se realizan actualmente en el laboratorio de Máquinas Eléctricas. Entre los procedimientos aplicados se realiza la parametrización de la máquina de inducción trifásica (jaula de ardilla o rotor bloqueado), para lo cual se realizan las pruebas de vacío, rotor bloqueado y prueba de carga a dos de los motores que se encuentran en dicho laboratorio.

Finalmente, para la elaboración de este proyecto se recopilan métodos y ecuaciones utilizadas en diferentes normas y estándares como la NTC 5642-2008 [3] y 5611-2002 [4], el IEEE Std 112-2004 [5], la ANSI/NEMA MG 1-2003 [6] y la IEC 60034-28 de 2010 [7]. También son utilizados como base para la determinación de dichos parámetros los proyectos de grado y tesis elaborados en la Universidad Tecnológica de Pereira referentes a la máquina de inducción.

1.2. Motivación

Este proyecto se realiza bajo la necesidad de evaluar las pruebas que se realizan en el laboratorio de máquinas eléctricas para la parametrización del motor de inducción, con respecto a la norma NTC 5642-2008. De este modo, los estudiantes del programa de Tecnología Eléctrica tendrían mayor certeza de los parámetros obtenidos en sus pruebas de laboratorio. La norma técnica colombiana NTC 5642-2008 [3], hace referencia a los métodos de ensayo para determinar las magnitudes en los parámetros de los circuitos equivalentes considerando como variable decisiva en la determinación de los parámetros la temperatura de los devanados y el aislamiento en motores de inducción de jaula de ardilla trifásicos de baja tensión, algo que no se tiene en cuenta en la guía de laboratorio de máquinas eléctricas en la Universidad Tecnológica de Pereira.

Con este proyecto se beneficia a los estudiantes del programa de Tecnología Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira, para un mejor desarrollo de su práctica de determinación de los parámetros de la máquina asíncrona en la asignatura de Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar los parámetros para el motor de inducción trifásico de jaula de ardilla con la norma NTC 5642-2008.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estudiar las principales características, el modo de operación, funcionamiento, obtención de parámetros y aplicaciones de los motores de inducción polifásicos.
- Realizar pruebas de parametrización a los motores de inducción trifásico jaula de ardilla de LabVolt™ y del grupo de trabajo 4 del Laboratorio de Máquinas Eléctricas siguiendo el procedimiento establecido en la guía de laboratorio de máquinas eléctricas.
- Realizar pruebas de parametrización a los mismos motores de inducción trifásicos del laboratorio de máquinas eléctricas utilizados en el objetivo anterior siguiendo el procedimiento establecido en la norma NTC 5642-2008.
- Comparar los resultados de las pruebas realizadas implementando los procedimientos establecidos en la guía de laboratorio de máquinas y la norma NTC 5642-2008.

1.4. Estructura del documento

El documento está dividido en seis 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 en jaula de ardilla y enfocado hacia la parametrización del mismo.

Luego, en los capítulos tres y cuatro, se presentan las pruebas para la determinación de los parámetros del motor de inducción trifásico utilizando las guías de laboratorio y la norma técnica colombiana, respectivamente. Además se muestran los resultados de las pruebas realizadas, los parámetros calculados y el respectivo análisis comparativo de éstos.

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

2. ESTUDIO DEL MOTOR POLIFÁSICO DE INDUCCIÓN

2.1. Introducción

El motor de inducción trifásico, también llamado motor asíncrono, es hoy día el motor eléctrico que más se utiliza en las aplicaciones industriales, sobre todo el motor con rotor de jaula de ardilla. Este motor es ampliamente utilizado debido a su robustez, fácil conexión, bajo mantenimiento y múltiples opciones de control, además su costo es relativamente bajo en comparación con otras máquinas rotativas de tamaños similares.

Cuando se hace referencia a los sistemas de control de los motores eléctricos es necesario en algunos casos conocer no sólo los datos nominales de placa, sino también algunas características propias para su modelado en un sistema más grande. Tal es el caso de los accionamientos eléctricos, cuya determinación de los parámetros propios del motor y un adecuado modelado, ayudan a dimensionar los elementos externos necesarios para un mejor funcionamiento del motor en una aplicación específica.

En este capítulo, se presenta un estudio general de la máquina polifásica de inducción, para luego realizar un acercamiento hacia el motor y su modelo equivalente por fase con sus respectivos parámetros.

2.2. Generalidades del motor de inducción trifásico

La máquina de inducción o asíncrona es una máquina de corriente alterna, en la cual la velocidad de rotación del rotor es menor que la del campo magnético del estator y ésta a su vez, depende de la carga. La máquina asíncrona tiene la propiedad de ser reversible, es decir que puede funcionar como motor y como generador.

El motor de inducción es el motor más utilizado en la industria debido a su fortaleza y simplicidad, debido a la ausencia de colector y al hecho de que sus características de funcionamiento se adaptan bien a una marcha en velocidad constante. Además es una máquina robusta, de fácil construcción y mantenimiento. Pero al igual que todas las máquinas, estos motores también tienen algunas desventajas como el alto consumo de reactivos.

El factor de potencia aumenta con la carga mecánica y alcanza su valor máximo a una carga aproximadamente igual a la nominal. Con carga inferior a la nominal el factor de potencia se reduce por lo que es conveniente, en lo posible, trabajar el motor de inducción a una carga cercana a la nominal o plena carga.

El motor de inducción se puede clasificar en dos grandes conjuntos, el de rotor bobinado (Wounded Rotor) y el de rotor en jaula de ardilla (Squirrel Cage), aunque este último es el más común. Sin embargo el circuito equivalente por fase es igual para ambos debido a que su comportamiento es el mismo.

Una particularidad de los motores eléctricos es su relación entre el par y la velocidad, pero dado que existe cierta dificultad para medir el par, este se calcula a través de la expresión (2.1).

$$\tau_{eje} = \frac{P_{eje}}{\omega_m} [N \cdot m] \quad (2.1)$$

Donde la velocidad mecánica (ω_m) debe estar en rad/s y la potencia en el eje o potencia de salida (P_{eje}) debe estar representada en vatios.

2.3. Principio de funcionamiento

El motor asincrónico funciona según el principio de inducción mutua de Faraday. Al aplicar corriente alterna trifásica a las bobinas inductoras, se produce un campo magnético giratorio, conocido también como campo rotante, cuya frecuencia será igual a la de la corriente alterna con la que se alimenta al motor. Este campo al girar alrededor del rotor en estado de reposo, inducirá corrientes en él mismo que producirán a su vez un campo magnético que seguirá el movimiento del campo estático, produciendo un par motor que hace que el rotor gire (principio de inducción mutua). No obstante, como la inducción en el rotor sólo se produce si hay una diferencia en las velocidades relativas del campo estático y el rotórico, la velocidad del rotor nunca alcanza a la del campo rotante. De lo contrario, si ambas velocidades fuesen iguales, no habría inducción y el rotor no produciría par. A esta diferencia de velocidad se la denomina "deslizamiento" y se mide en términos porcentuales, por lo que ésta es la razón por la cual a los motores de inducción se los denomina asincrónicos, ya que la velocidad rotórica difiere levemente de la del campo rotante. El deslizamiento varía con la carga mecánica aplicada al rotor, siendo máximo con la máxima carga aplicada al mismo. Sin embargo, a pesar de esto el motor varía poco su velocidad, pero el par aumenta (y con ello la intensidad de corriente consumida) por lo que se puede deducir que son motores de velocidad constante [8].

En términos eléctricos, se puede definir al motor asincrónico como un transformador eléctrico cuyos bobinados del estator representan el primario, y los devanados del rotor equivalen al secundario de un transformador en cortocircuito. En el momento del arranque, como producto del estado de reposo del rotor, la velocidad relativa entre campo estático y rotórico es muy elevada. Por lo tanto, la corriente inducida en el rotor es muy alta y el flujo de rotor (que se opone

siempre al del estator) es máximo. Como consecuencia, la impedancia del estator es muy baja y la corriente absorbida de la red es muy alta.

Al ganar velocidad el rotor, la corriente del mismo disminuye, el flujo rotórico también, y con ello la impedancia de los devanados del estator, pues como se describió anteriormente es un fenómeno de inducción mutua. La situación es la misma que la de conectar un transformador con el secundario en corto a la red de corriente alterna (CA) y luego con una resistencia variable intercalada ir aumentando progresivamente la resistencia de carga hasta llegar a la corriente nominal del secundario. Por ende, lo que sucede en el circuito estático es un reflejo de lo que sucede en el circuito rotórico.

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

Suponiendo que un motor de inducción comercial de jaula de ardilla se haga arrancar con la tensión nominal en las terminales de línea de su estator (arranque directo) desarrollará un par de arranque de acuerdo que hará que aumente su velocidad. Al aumentar su velocidad a partir del reposo (100% de deslizamiento), disminuye su deslizamiento y su par disminuye hasta el valor en el que se desarrolle el par máximo. Esto hace que la velocidad aumente todavía más, reduciéndose en forma simultánea el deslizamiento y el par que desarrolla el motor de inducción [9].

La velocidad síncrona se puede definir mediante la ecuación (2.2).

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} \quad (2.2)$$

Dónde: P es el número de polos del motor.

f es la frecuencia de la red eléctrica a la que se encuentra conectado.

n_s es la velocidad de sincronismo.

El campo magnético giratorio es creado por los devanados trifásicos del estator y gira a velocidad síncrona. La corriente que circula en los tres devanados se compone en forma vectorial y resulta un vector (campo) que gira en el sentido de las manecillas del reloj si los devanados de las fases R, S y T, son conectados correctamente a sus respectivas fases r, s y t. Aunque se puede cambiar el sentido de giro del rotor con tan solo cambiar dos de sus tres fases [8].

2.4. Particularidades del motor de inducción

2.4.1. Características en vacío y a rotor bloqueado

La diferencia entre la velocidad sincrónica n_s y la velocidad de funcionamiento de régimen n_m también depende del tamaño de la máquina, inclusive durante el funcionamiento de régimen esta diferencia es aproximadamente de entre el 3% y el 10% [2]. El deslizamiento es una de las características más importantes de una máquina de inducción, y por ello también se encuentra involucrado en el modelo que representa al motor asíncrono.

Por lo descrito, en vacío el deslizamiento es muy pequeño, por lo tanto la corriente del rotor es muy pequeña solamente la suficiente para vencer el par sin carga. Mientras que la velocidad del rotor será máxima y muy cercana a la de sincronismo, entonces mantendrá un bajo factor de potencia. En rotor bloqueado no existe velocidad en el rotor, por lo que el deslizamiento es del 100%, es decir de 1, entonces la tensión de entrada será la misma tensión del rotor. Este efecto se puede ver reflejado también en la corriente y en la frecuencia del rotor.

2.4.2. Par de arranque del motor

El par de arranque de un motor de inducción es generalmente más grande que el par nominal. Una vez que se desarrolla el par de arranque, la frecuencia, la reactancia y la tensión inducida en el rotor disminuyen debido a que el deslizamiento es directamente proporcional para ellos. Como disminuye la tensión inducida en el rotor también disminuye la corriente. Contrario a esto, aumenta el factor de potencia compensando así para obtener un par máximo de arranque.

Al igual que el par en el eje, la corriente en el estator es particularmente elevada durante el arranque del motor, debido a que es en este momento cuando se debe vencer la inercia debida al peso del eje del motor. Es así como la corriente de arranque puede llegar a valores de hasta 7 veces la corriente nominal. Este valor no hace ningún daño al motor ya que es transitorio, y el fuerte par de arranque hace que el rotor gire enseguida, pero causa bajones de tensión abruptos y momentáneos que se manifiestan sobre todo como parpadeo en las lámparas y puede producir daños en equipos electrónicos sensibles [8].

Los motores de inducción están diseñados para soportar la corriente de arranque, pero los arranques repetidos y muy frecuentes sin periodos de descanso, pueden elevar progresivamente la temperatura del estator y comprometer la vida útil de los devanados del mismo hasta originar fallas por derretimiento del aislamiento. Por

eso se utilizan en potencias medianas y grandes, dispositivos electrónicos de "arranque suave", que minimizan la corriente de arranque del motor.

2.4.3. Estator

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

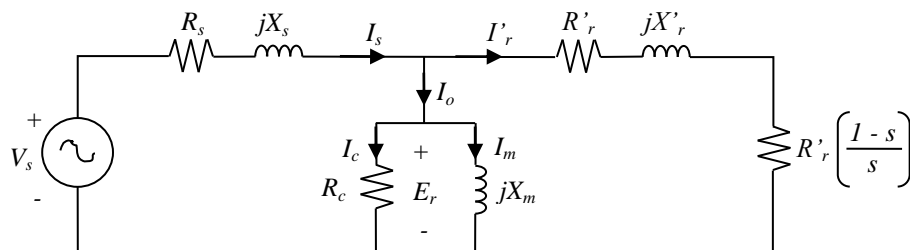
2.4.4. Rotor

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

2.4.5. Circuito equivalente del motor de inducción trifásico

En la Figura 1, se muestra el circuito equivalente por fase de una máquina de inducción trifásica con sus respectivos parámetros, este circuito permite comprender de forma matemática la relación entre las variables que involucra la máquina.

Figura 1. Circuito equivalente por fase del motor de inducción polifásico.



Fuente: Guru & Hizioglu. Máquinas Eléctricas y Transformadores [2].

El conocimiento de los parámetros del motor de inducción es la piedra angular en el diseño, fabricación, evaluación y aplicación de la máquina. Actualmente, el flujo del rotor no puede ser medido directamente, ya que presenta una características altamente no lineal. La identificación de parámetros es una técnica apropiada para la reconstrucción de funciones desconocidas u objetos difíciles de medir que aparecen como diversos parámetros en sistemas de ecuaciones diferenciales para modelar adecuadamente esta máquina [10].

La forma convencional de obtener los parámetros de la máquina de inducción polifásica es mediante ensayos de carga, y ensayos de operación en vacío y con rotor bloqueado. Entre los esfuerzos realizados para intentar obtener un modelo cada vez más preciso y completo de esta máquina, se encuentra la estimación de parámetros al motor de inducción a partir de los datos del fabricante [11], donde se desarrolla una metodología para obtener los parámetros del motor de inducción en régimen permanente a partir de los datos entregados por los fabricantes en sus catálogos, luego los parámetros son calculados analíticamente.

En [9] se realiza un estudio acerca de los datos del catálogo en motores de inducción trifásicos. Este estudio consigue parametrizar los componentes de los circuitos equivalentes por fase de un motor de inducción trifásico de manera que se pudiera saber cuál es el comportamiento de dicho motor sin realizar ensayos de laboratorio y comparar esta información con los datos de placa de dicha máquina.

También es posible encontrar formas de determinar los parámetros mediante ensayos externos de la máquina y aplicando algunos algoritmos computacionales como en [10], donde se calculan los parámetros de esta máquina utilizando un algoritmo de optimización por cúmulo de partículas (PSO).

3. PARAMETRIZACIÓN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO EN JAULA DE ARDILLA IMPLEMENTANDO LA GUÍA DE LABORATORIO DE MÁQUINAS

3.1. Introducción

Existen diversas formas de estimar los parámetros en un motor asíncrono trifásico, pero la forma más nombrada en las referencias bibliográficas es la basada en una única muestra obtenida a partir de ensayos de vacío y rotor bloqueado del motor.

En el laboratorio de máquinas eléctricas del programa de Tecnología Eléctrica se implementa dicha metodología, por lo que en este capítulo se presenta un resumen de la misma y los resultados de la realización de estos ensayos para la determinación de los parámetros que hacen parte del circuito equivalente por fase del motor de inducción trifásico.

3.2. Resumen de la guía de laboratorio de máquinas eléctricas: características con carga, pruebas sin carga y de rotor bloqueado, parámetros

3.2.1. Objetivos

Estudiar las características de velocidad y factor de potencia en función de la carga en el motor de inducción.

Determinar los parámetros del motor de inducción a partir de las medidas de la resistencia y de las pruebas de vacío y rotor bloqueado. Calcular la eficiencia del motor de inducción.

3.2.2. Prueba de resistencia en los bobinados

Se mide la resistencia en corriente directa (CD) por fase del estator R_S , empleando uno de los métodos sugeridos a continuación.

- La resistencia efectiva del estator puede determinarse midiendo la resistencia por fase en CD con un puente de Wheatstone, por ejemplo, y multiplicando este valor por 1.25 para obtener la resistencia en CA.
- La resistencia efectiva del estator puede determinarse alimentando con una fuente variable de CD y alcanzando la corriente nominal, con el fin de que el bobinado de él estator alcance a una temperatura similar a la de régimen.

3.2.3. Prueba de rotor bloqueado

Esta prueba se lleva a cabo con el fin de hallar el valor de la resistencia y la reactancia de rotor referidas al estator. Se debe prestar especial cuidado al realizar la prueba pues la temperatura del motor tiende a subir rápidamente.

La prueba consiste en aplicar al motor una tensión de bajo valor y también a una baja frecuencia, que permita mantener el rotor en reposo sujetándolo externamente. En lo posible los amperímetros deben marcar la corriente nominal. Se deben tomar los datos de potencia activa de entrada al motor, corriente de línea y tensión de línea ($P_{rb3\phi}$, $I_{rb1\phi}$ y V_{rbLL}).

Como en el laboratorio se trabaja el caso de motores trifásicos se utiliza para la obtención del modelo los valores por fase, es decir, se debe tomar la potencia trifásica de alimentación a rotor bloqueado $P_{rb3\phi}$ y dividirla entre 3 para así obtener la potencia monofásica $P_{rb1\phi}$. Según la conexión del bobinado del motor, estrella o triángulo, se obtiene los valores por fase de $V_{rb1\phi}$ e $I_{rb1\phi}$. Luego se relacionan estas mediciones como se presenta en las ecuaciones (3.1) a (3.3).

$$Z_{eq} = \frac{V_{rb1\phi}}{I_{rb1\phi}} \quad (3.1)$$

$$R_{eq} = \frac{P_{rb1\phi}}{I_{rb1\phi}^2} \quad (3.2)$$

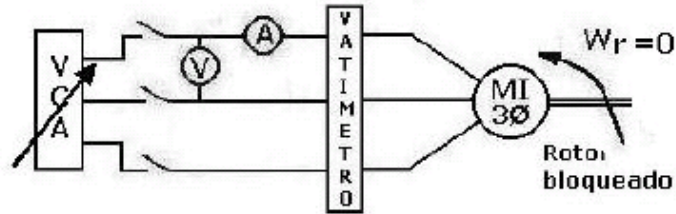
$$X'_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (3.3)$$

Para la consideración de la baja frecuencia, la reactancia debe ser corregida para 60 Hz aplicando la ecuación (3.4), que es la frecuencia nominal de la red eléctrica en Colombia.

$$X_{eq} = X'_{eq} \times \frac{f_{nom}}{f_{rb}} \quad (3.4)$$

Por medio de una fuente de tensión alterna y regulable, suministre una tensión pequeña (preferiblemente a frecuencia baja: 15 Hz) al motor de inducción, hasta que $I_{rb1\phi}$ sea aproximadamente el valor de la corriente nominal. Mida rápidamente $I_{rb1\phi}$, $P_{rb1\phi}$ y la tensión aplicada $V_{rb1\phi}$. Utilice el circuito de la Figura 2.

Figura 2. Prueba de rotor bloqueado del motor de inducción trifásico.

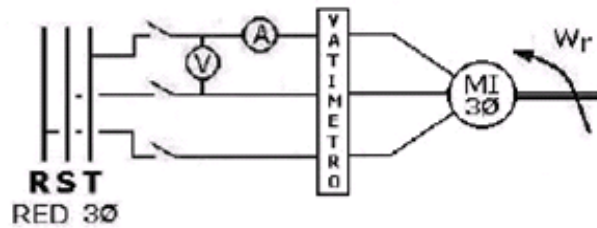


Fuente: Libro guía para laboratorio unificado de máquinas (CD Y CA) [12].

3.2.4. Prueba de vacío

Para el circuito de la Figura 3 y en vacío (generador CD sin carga o dinamómetro sin carga) mide $I_{1\phi}$, $P_{1\phi}$ y velocidad, con la tensión nominal aplicada $V_{1\phi}$.

Figura 3. Motor de inducción trifásico en vacío.



Fuente: Libro guía para laboratorio unificado de máquinas (CD Y CA) [12].

3.2.5. Discriminación de parámetros en estator y rotor

Como no es posible determinar el valor de la resistencia del rotor a partir de mediciones directas en el estator, ésta se obtiene mediante la expresión (3.5) y considerando la resistencia equivalente de la máquina, entonces la resistencia del rotor R_r referida al estator será:

$$R'_r = R_{eq} - R_s \quad (3.5)$$

Con respecto a la reactancia, en la práctica se maneja la Tabla 1 para la distribución de los valores de reactancia entre estator y rotor.

Tabla 1. Distribución empírica de X_{eq} de acuerdo al diseño del motor.

Tipo	X_s	X'_r
A / D	$0,5 X_{eq}$	$0,5 X_{eq}$
B	$0,4 X_{eq}$	$0,6 X_{eq}$
C	$0,3 X_{eq}$	$0,7 X_{eq}$

Fuente: Libro guía para laboratorio unificado de máquinas (CD Y CA) [12].

3.2.6. Característica con carga

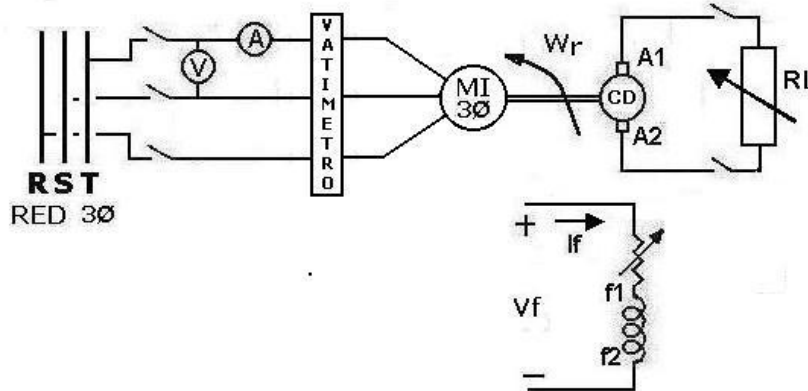
1. Conectar el circuito de la Figura 4. Siempre se debe tomar precauciones para proteger los instrumentos de medida en el momento de arranque.
2. Aplicar tensión nominal a la máquina.
3. Por medio de un generador CD acoplado a su eje, cárguelo hasta el 150% de su valor nominal.

Se debe tomar la mayor cantidad de puntos de trabajo posibles. En cada caso mida $I_{1\phi}$, $P_{1\phi}$ y velocidad en rpm; si dispone de medidor de par anote los valores de éste. (En LabVolt™ puede utilizar el Electrodinamómetro en lugar del generador CD).

3.2.7. Prueba a carga nominal

Para el circuito de la Figura 4 mida $I_{1\phi}$, $P_{1\phi}$ y velocidad, cuando por las líneas circule la corriente nominal. Si la tensión es diferente a la nominal anote su valor.

Figura 4. Motor de inducción trifásico con carga.



Fuente: Libro guía para laboratorio unificado de máquinas (CD Y CA) [12].

La potencia medida en la prueba de vacío equivale a las pérdidas por fricción, ventilación y pérdidas en el hierro. Estas pérdidas permanecen constantes en condiciones nominales. Con los datos de la prueba en carga nominal calcule la eficiencia utilizando la expresión (3.6).

$$\eta = \frac{P_{entrada} - P_{pérdidas}}{P_{entrada}} \times 100\% \quad (3.6)$$

3.3. Cálculo de los parámetros del motor de inducción

Siguiendo la guía de trabajo del laboratorio de máquinas eléctricas se procede a obtener los parámetros del motor de inducción trifásico en jaula de ardilla de LabVolt™ y del grupo de trabajo número 4 de dicho laboratorio.

3.3.1. Motor de jaula de ardilla de 4 polos de LabVolt™

Se realizan las pruebas al motor asíncrono de la Figura 5.

Figura 5. Motor de jaula de ardilla de 4 polos de LabVolt™.



Fuente: Imagen propia tomada en el laboratorio.

Prueba de CD:

Tabla 2. Medidas de la prueba de corriente directa para el motor de LabVolt™.

Tensión [V]	Corriente [A]
$V_{RS} = 15.76$	$I_{RS} = 1.2$
$V_{ST} = 15.85$	$I_{ST} = 1.2$
$V_{TR} = 15.87$	$I_{TR} = 1.2$

La máquina se encuentra conectada en estrella, por lo que aplicando la expresión (3.7) con los valores de la Tabla 2, la cual no está especificada en la guía de laboratorio, se calcula la resistencia por fase del estator.

$$R_s = K_{CA} \times \frac{1}{2} \times \frac{V_{CD}}{I_{CD}} \quad (3.7)$$

Donde $K_{CA} = 1$, pues se realizó el procedimiento de alimentación directa de los devanados en CD hasta obtener la corriente nominal de la máquina. Entonces, se obtienen que las resistencias efectivas del estator como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Resistencia de los devanados estáticos del motor de LabVolt™.

R_s [Ω]	Promedio R_s [Ω]
6.567	
6.604	6.595
6.613	

Así se tiene que la resistencia efectiva del estator es de 6.595 Ω por fase.

Prueba de rotor bloqueado:

Se toman los datos correspondientes a potencia activa de entrada ($P_{rb1\phi}$), corriente de línea ($I_{rb1\phi}$) y tensión de fase ($V_{rb1\phi}$) aplicando el procedimiento de la prueba de rotor bloqueado que se describe en la sección 3.2.3.

Tabla 4. Medidas de la prueba de rotor bloqueado para el motor de LabVolt™.

Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Frecuencia [Hz]	Velocidad [rpm]
$V_R = 20.52$	$I_R = 0.946$			
$V_S = 20.53$	$I_S = 0.926$	$P_{3\phi} = 53.37$	19.74	0
$V_T = 20.55$	$I_T = 0.933$			

Luego aplicando las ecuaciones (3.1) a (3.4) se obtienen los parámetros de la rama de dispersión del circuito equivalente de la Figura 1, utilizando los promedios aritméticos de los valores obtenidos para esta prueba en este motor.

Tabla 5. Impedancias equivalentes calculadas para el motor de LabVolt™.

Z_{eq} [Ω]	R_{eq} [Ω]	X_{eq} [Ω]
21.961	20.349	25.097

Luego aplicando la ecuación (3.5) se calcula la resistencia del rotor referida al estator del motor.

$$R'_r = 13.755 \Omega$$

E implementando la Tabla 1 a la reactancia equivalente de la Tabla 5, se tiene información separada de la reactancia tanto de estator como de motor. Aunque para ello se debe tener información de la clase NEMA del motor partiendo del conocimiento de sus características de carga y de arranque. De acuerdo a [2], “un motor clase A se considera estándar y es apropiado para aplicaciones de velocidad constante. El motor puede arrancar aplicando la tensión especificada. Desarrolla un par de 125 a 175% del par a plena carga. La corriente de arranque a la tensión especificada es de cinco a seis veces la corriente especificada. El deslizamiento a plena carga es casi siempre menor de 5% debido a que la resistencia del rotor es relativamente baja. La regulación de velocidad es de 2 a 4%. Las barras del rotor están colocadas cerca de la superficie de las laminaciones del rotor con objeto de reducir la reactancia de dispersión. Estos motores impulsan carga de inercia baja y poseen aceleraciones altas. Se emplean en aplicaciones como ventiladores, sopladores, bombas centrífugas y máquinas-herramientas”.

$$\text{Motor clase A: } X_s = X'_r = 12.548 \Omega$$

Prueba de vacío:

Se toman los datos correspondientes a potencia activa de entrada ($P_{1\phi}$), corriente de línea ($I_{1\phi}$) y tensión de fase ($V_{1\phi}$) aplicando el procedimiento de la prueba de rotor bloqueado que se describe en la sección 3.2.4.

Tabla 6. Medidas de la prueba de vacío para el motor de LabVolt™.

Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Frecuencia [Hz]	Velocidad [rpm]
$V_R = 120.5$	$I_R = 0.758$			
$V_S = 119.8$	$I_S = 0.683$	$P_{3\phi} = 87.51$	60.04	1775
$V_T = 120.6$	$I_T = 0.797$			

Aunque la guía de laboratorio específica el procedimiento para la realización del ensayo de vacío, no presenta las ecuaciones necesarias para obtener dichos parámetros a partir de los datos de la Tabla 6, por lo que se requiere de la solución del circuito equivalente por fase de la máquina y de los parámetros de los devanados para obtener los valores de la rama de magnetización. A partir del análisis del circuito equivalente por fase de la Figura 1 se obtiene las ecuaciones (3.8) a (3.13):

$$\theta_Y = \cos^{-1} \left(\frac{P_{1\phi}}{V_{1\phi} \times I_{1\phi}} \right) \quad (3.8)$$

$$\mathbb{I}_s = I_{1\varphi} \angle -\theta_Y \quad (3.9)$$

$$\mathbb{E}_r = \mathbb{V}_{1\varphi} - \mathbb{I}_s (R_s + jX_s) \quad (3.10)$$

$$\mathbb{I}'_r = \frac{\mathbb{E}_r}{\frac{R'_r}{s} + jX'_r} \quad (3.11)$$

$$\mathbb{I}_o = \mathbb{I}_s - \mathbb{I}'_r \quad (3.12)$$

$$\mathbb{Y}_o = \frac{\mathbb{I}_o}{\mathbb{E}_r} = \frac{1}{R_c} - j \frac{1}{X_m} \quad (3.13)$$

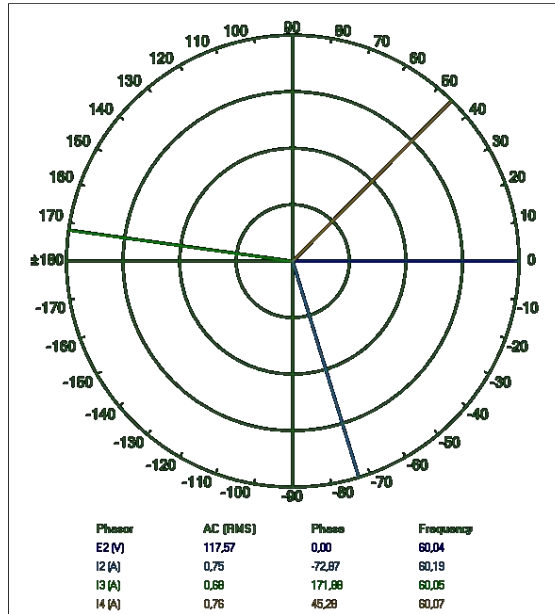
A partir de los anteriores cálculos se obtienen los parámetros de la rama de excitación del motor en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros calculados para la rama de excitación del motor de LabVolt™.

\mathbb{Y}_o [mS]	R_c [Ω]	X_m [Ω]
6.534	906.409	155.265

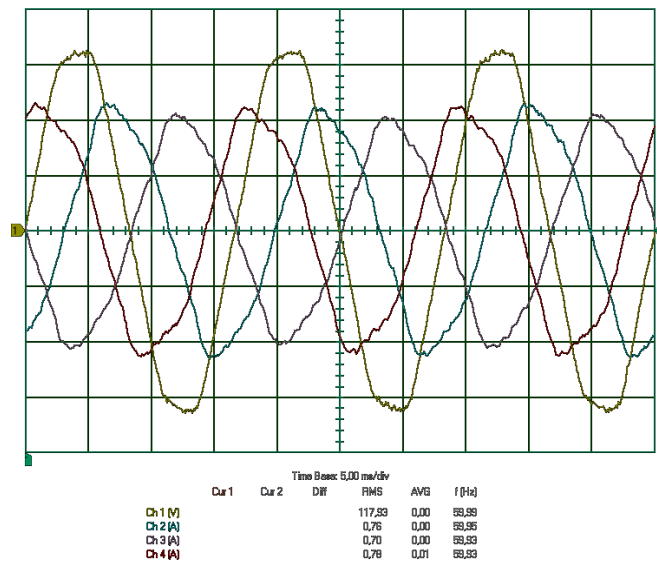
Hasta ahora se tienen todos los parámetros del motor de inducción de jaula de ardilla de LabVolt™ implementando la guía de laboratorio. Como complemento a lo solicitado por la guía, se realizó un análisis del estado de balance entre las fases (Figura 6 y Figura 7) para su comparación con la norma técnica colombiana.

Figura 6. Análisis de fasores para medición del ángulo de desfase entre las corrientes.



Fuente: Herramienta para el análisis fasorial de LabVolt™.

Figura 7. Visualización de las señales de corriente de alimentación del motor de inducción de LabVolt™.



Fuente: Herramienta osciloscopio de LabVolt™.

3.3.2. Grupo de trabajo número 4

Se repite el mismo procedimiento del caso del motor de LabVolt™, pero esta vez en el motor de inducción trifásico del grupo 4 del laboratorio de máquinas (Figura 8).

Figura 8. Placa de características del motor de inducción del grupo 4.



Fuente: Imagen propia tomada en el laboratorio.

Prueba de CD:

Tabla 8. Medidas de la prueba de corriente directa para el motor del grupo 4.

Tensión [V]	Corriente [A]
$V_{RS} = 14.51$	$I_{RS} = 8.4$
$V_{ST} = 14.56$	$I_{ST} = 8.4$
$V_{TR} = 14.36$	$I_{TR} = 8.4$

La máquina se encuentra conectada en estrella, por lo que se aplica nuevamente la expresión (3.7) con los valores de la Tabla 8, y se calcula la resistencia por fase del estator utilizando una constante $K_{CA} = 1$, puesto que al igual que en caso de LabVolt™ se realizó el procedimiento de alimentación directa de los devanados en CD hasta obtener la corriente nominal de la máquina. Entonces, se obtienen que las resistencias efectivas del estator como se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Resistencia de los devanados estáticos del motor del grupo 4.

R_s [Ω]	Promedio R_s [Ω]
0.864	
0.867	0.862
0.855	

Así se tiene que la resistencia efectiva del estator es de 0.862Ω por fase.

Prueba de rotor bloqueado:

Se toman los datos correspondientes a potencia activa de entrada ($P_{rb1\phi}$), corriente de línea ($I_{rb1\phi}$) y tensión de fase ($V_{rb1\phi}$) aplicando el procedimiento de la prueba de rotor bloqueado que se describe en la sección 3.2.3.

Tabla 10. Medidas de la prueba de rotor bloqueado para el motor del grupo 4.

Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Frecuencia [Hz]	Velocidad [rpm]
$V_R= 28.23$	$I_R= 8.5$	$P_{3\phi}= 390$	48.28	0
$V_S= 28.23$	$I_S= 8.7$			
$V_T= 28.23$	$I_T= 8.5$			

NOTA: Al mover la pinza voltiamperimétrica se afecta la sensibilidad (Figura 9).

Aplicando nuevamente las ecuaciones (3.1) a (3.4) se obtienen los parámetros de la rama de dispersión del circuito equivalente de la Figura 1, utilizando los promedios aritméticos de los valores obtenidos en la Tabla 10 para las pruebas realizadas en este motor.

Figura 9. Corriente de alimentación utilizando la pinza voltiamperimétrica.



Fuente: Imagen propia tomada en el laboratorio.

Tabla 11. Impedancias equivalentes calculadas para el motor del grupo 4.

Z_{eq} [Ω]	R_{eq} [Ω]	X_{eq} [Ω]
3.296	1.771	3.454

Luego, aplicando la ecuación (3.5) se calcula la resistencia del rotor referida al estator del motor.

$$R'_r = 0.910 \Omega$$

E implementando la Tabla 1 a la reactancia equivalente de la Tabla 11Tabla 5, se tiene información separada de la reactancia tanto de estator como de motor. Aunque para ello se debe tener información de la clase NEMA del motor partiendo del conocimiento de sus características de carga y de arranque. De acuerdo a [2], “generalmente, un motor clase C tiene un rotor de doble jaula y está diseñado para arrancar con tensión plena. La resistencia elevada del rotor limita la corriente de arranque entre 3.5 y 5 veces la corriente a plena carga. El par de arranque es de 200 a 275% del par a plena carga. La regulación de velocidad es de 4 a 5%. Los motores clase C se emplean en aplicaciones que requieren pares de arranque elevados, como bombas de compresión, trituradores, horadores, bandas transportadoras, maquinaria textil y equipos para trabajar madera”.

$$\begin{aligned} \text{Motor clase C: } X_s &= 1.036 \Omega \\ X'_r &= 2.418 \Omega \end{aligned}$$

Prueba de vacío:

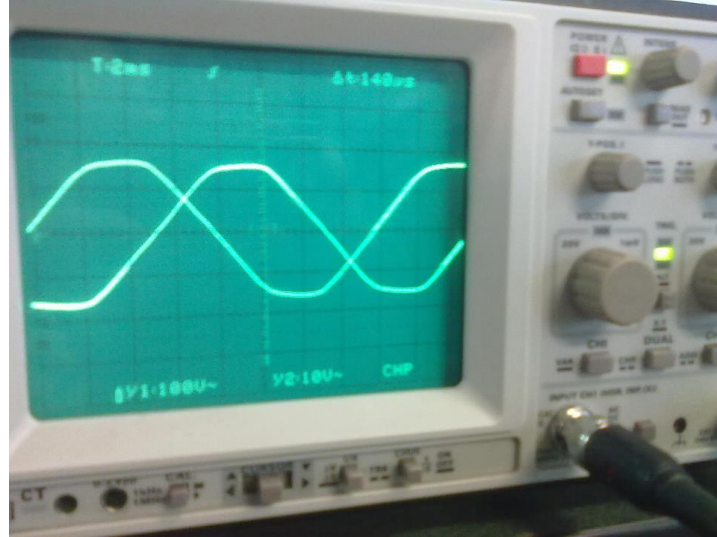
Se toman los datos correspondientes a potencia activa de entrada ($P_{1\phi}$), corriente de línea ($I_{1\phi}$) y tensión de fase ($V_{1\phi}$) aplicando el procedimiento de la prueba de rotor bloqueado que se describe en la sección 3.2.4.

Tabla 12. Medidas de la prueba de vacío para el motor del grupo 4.

Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Frecuencia [Hz]	Velocidad [rpm]
$V_R= 120.7$	$I_R= 4.5$	$P_{3\phi}= 280$	59.80	1797
$V_S= 120.7$	$I_S= 4.0$			
$V_T= 120.7$	$I_T= 4.0$			

NOTA: La diferencia entre fases R y S es de 121.5° y entre R y T el desfase entre fases es de 119° , estos desfases se obtuvieron mediante la conexión de un osciloscopio y utilizando la fase R como referencia (Figura 10).

Figura 10. Obtención del desfase empleando un osciloscopio.



Fuente: Imagen propia tomada en el laboratorio.

Finalmente se repite el procedimiento para el cálculo de los parámetros de la rama de magnetización empleando las ecuaciones (3.8) a (3.13) a partir de los datos de la Tabla 12. De los anteriores cálculos se obtienen los parámetros de la rama de excitación del motor en la Tabla 13.

Tabla 13. Parámetros calculados para la rama de excitación del motor del grupo 4.

Y_o [mS]	R_c [Ω]	X_m [Ω]
35.717	249.37	28.176

De este modo, queda parametrizada tanto la rama de dispersión como la de excitación de ambos motores asíncronos trifásicos de jaula de ardilla. A modo de aclaración, no se realiza el procedimiento de cálculo de la eficiencia de la sección 3.2.7, debido a que esta no hace parte de los objetivos de comparación planteados en el presente trabajo.

4. PARAMETRIZACIÓN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO EN JAULA DE ARDILLA IMPLEMENTANDO LA NORMA NTC 5642-2008

4.1. Introducción

Esta norma proporciona unos procedimientos de ensayos normalizados para determinar los parámetros del motor eléctrico. Al mismo tiempo, esta norma permite una mayor comprensión del método del circuito equivalente. El objetivo principal de la norma es brindar asistencia para el modelado de los motores controlados con frecuencia. Debido a las simplificaciones, los resultados no se pueden utilizar para determinar con exactitud el desempeño del motor o su eficiencia [3].

Adicionalmente, en este capítulo se muestra cómo esta norma permite una mayor comprensión del método de circuito equivalente y los resultados de la realización de estos ensayos para la determinación de los parámetros. Los ensayos se realizan en las mismas máquinas del capítulo anterior para una adecuada comparación.

4.2. Resumen de la NTC 5642-2008: 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

4.2.1. Objetivos

Esta norma se aplica a motores de inducción de jaula de ardilla trifásicos de baja tensión, para tamaños constructivos desde el número 56 al 400, como se especifica en la NTC 3924-1996 [13] (IEC 60072-1).

Esta norma establece procedimientos para obtener valores de elementos de los modelos de circuitos equivalentes monofásicos a partir de ensayos, y define elementos normalizados de estos diagramas.

4.2.2. Requisitos para hacer la práctica

4.2.2.1. Ensayos con carga

Siguiendo la norma para hacer dicha práctica, la temperatura del devanado del estator no debe diferir en más de 5°C con respecto a la temperatura obtenida en la práctica térmica de carga nominal según la NTC 2805-2005 [14].

Lo que se hace en esta práctica es aplicarle una tensión nominal a los terminales, luego se incrementa la carga para que la corriente de línea sea igual a la corriente nominal.

De acuerdo al procedimiento, se toman los datos correspondientes que son: U es la tensión de terminales del estator, P_1 es la potencia eléctrica de entrada, n es la velocidad de operación del motor e I es la corriente de línea del estator. Por último, con los resultados obtenidos de las mediciones lo que se hace a continuación son los respectivos cálculos.

4.2.2.2. Instrumentación

Instrumentos de medición para magnitudes eléctricas, velocidad y frecuencia: Los instrumentos de medición deben tener una clase de exactitud de 0,5 o superior, de acuerdo con la NTC 3504-2000 [15] (IEC 60051-1).

Transformadores de medida: Los transformadores de medida deben tener una clase de exactitud de 0,2 de acuerdo con la norma IEC 60044.

Medición de temperatura: La instrumentación usada para medir las temperaturas deben tener una exactitud de $\pm 1^\circ\text{C}$.

NOTA: Debe considerarse que los equipos disponibles en el laboratorio no tienen ningún certificado de calibración, por lo que no hay certeza en la medición de los instrumentos.

4.2.2.3. Aproximaciones e incertidumbres

Los procedimientos descritos para obtener los valores de los parámetros del circuito equivalente incluyen aproximaciones. Además, el circuito equivalente es una aproximación en sí mismo.

Las inductancias se determinan dependiendo de la corriente, con el fin de tener en cuenta los efectos de saturación del núcleo de hierro.

Para ajustar la resistencia equivalente de pérdidas en el hierro, a otras frecuencias diferentes de las nominales, es necesario conocer la distribución de las pérdidas de histéresis contra las pérdidas de corrientes parásitas.

4.2.2.4. Generalidades de los procedimientos de ensayo

Se debe usar el promedio aritmético de las tres corrientes y tensiones de línea. La resistencia entre líneas del estator es el valor entre dos terminales para los cuales se haya medido un valor de referencia a una temperatura conocida.

Se recomienda que siempre que se requieran mediciones de tensión, corriente, velocidad o potencia para un determinado punto de carga.

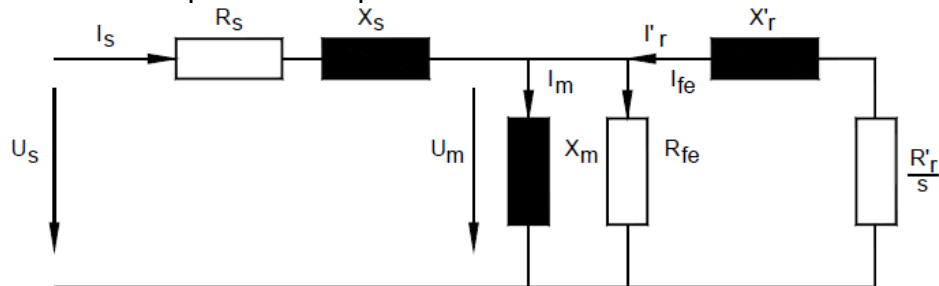
4.2.3. Medición de la resistencia entre líneas del estator, en CD

Medir y registrar $R_{ll,m}$. La resistencia se debe tomar como el valor promedio de las mediciones de todas las tres fases. Además se necesita medir y registrar la temperatura del devanado θ_0 , de acuerdo con la norma NTC 2805-2005 [14].

4.2.4. Determinación de los parámetros del circuito equivalente de los motores

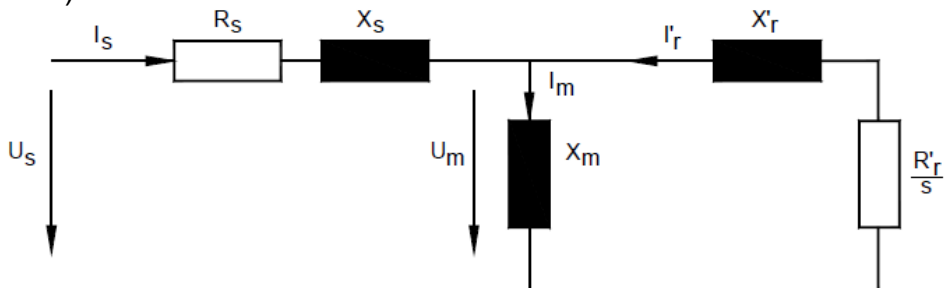
De acuerdo a la norma, el circuito equivalente por fase al que se le deben obtener los parámetros se presentan en las Figura 11 a Figura 13.

Figura 11. Circuito equivalente Tipo T.



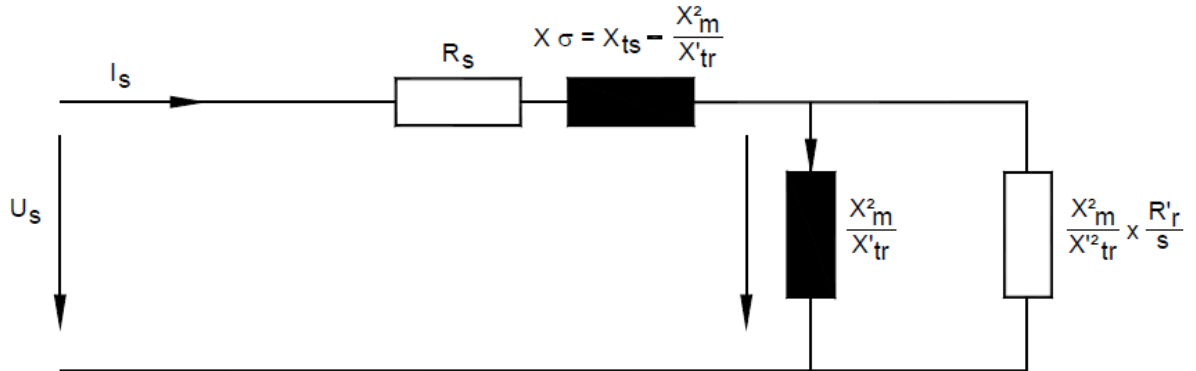
Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 5642-2008 [3].

Figura 12. Circuito equivalente Tipo T (sin tener en cuenta las pérdidas en el hierro).



Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 5642-2008 [3].

Figura 13. Circuito equivalente Tipo L (sin tener en cuenta las pérdidas en el hierro).



Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 5642-2008 [3].

De la Figura 11 se observa que la resistencia de pérdidas en el hierro (R_{fe}), es la misma resistencia R_c de las pruebas realizadas en el capítulo anterior, éste es el circuito equivalente normativo para los motores a los que hace referencia la norma. Los circuitos de la Figura 12 y Figura 13 son matemáticamente idénticos y ambos presentan una variante simplificada sin la resistencia de pérdidas en el hierro.

4.2.5. Resistencia del devanado del estator R_s

- En el caso de devanados conectados en estrella (Y) o una conexión equivalente a la de estrella se emplea (4.1).

$$R_{S,25} = \frac{1}{2} \times R_{II,m} \times \frac{K_S + 25}{K_S + \theta_0} \quad (4.1)$$

- En el caso de devanados conectados en triángulo (Δ) se emplea (4.2).

$$R_{S,25} = \frac{3}{2} \times R_{II,m} \times \frac{K_S + 25}{K_S + \theta_0} \quad (4.2)$$

4.2.6. Resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro R_{fe}

4.2.6.1. Pérdidas constantes

Al restar las pérdidas en el devanado del estator sin carga, de la entrada de potencia sin carga, se obtienen las pérdidas constantes P_K de la ecuación (4.3),

que son la suma de las pérdidas por fricción, ventilación y las pérdidas en el núcleo.

$$P_K = P_1 - 3 \times I_S^2 \times R_{S,25} \times \frac{K_S + \theta_{NL}}{K_S + 25} \quad (4.3)$$

4.2.6.2. Pérdidas por ventilación y fricción

Las pérdidas por ventilación y fricción se consideran independientes de la carga. No se incluyen en el circuito equivalente, pero se pueden tener en cuenta mediante la reducción de la potencia de salida mecánica calculada. Las pérdidas por fricción son dependientes linealmente de la velocidad del motor, n .

4.2.6.3. Pérdidas en el hierro

Para determinar las pérdidas en el hierro se mide a partir de la expresión (4.4).

$$P_{fe} = P_K - P_{fw} \quad (4.4)$$

Luego para determinar la resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro se utiliza la ecuación (4.5).

$$R_{fe} = \frac{3 \times U_S^2}{P_{fe}} \quad (4.5)$$

4.2.7. Inductancia total del estator $L_{ts} = L_m + L_s$

En $s = 0$, la resistencia equivalente del rotor R'_r/s llega ser infinita, por tanto la parte reactiva de la impedancia medida es el resultado solamente de la conexión en serie de las dos inductancias.

4.2.8. Inductancia de dispersión total L_σ

Para valores de deslizamiento grandes, la resistencia de rotor equivalente R'_r/s se hace insignificante en comparación con la reactancia $2\pi f L_m^2 / L_{tr}$ y por tanto la parte reactiva de la impedancia medida resulta principalmente de la inductancia de dispersión total L_σ .

Los métodos descritos en esta norma permiten solamente determinar la suma de las inductancias de dispersión del estator y del rotor.

Para determinar la impedancia y el factor de potencia del motor se utiliza las ecuaciones (4.6) y (4.7), según el caso.

- En el caso de devanados en estrella (Y)

$$Z = \frac{U}{I \times \sqrt{3}} \quad (4.6)$$

- En el caso de devanados conectados en delta (Δ)

$$Z = \frac{U \times \sqrt{3}}{I} \quad (4.7)$$

Para determinar el factor de potencia se utiliza la siguiente ecuación:

$$\cos(\varphi) = \frac{P_1}{U \times I \times \sqrt{3}} \quad (4.8)$$

Para determinar la resistencia se utiliza la siguiente ecuación:

$$R = Z \times \cos(\varphi) \quad (4.9)$$

4.2.9. Corrección del desplazamiento de corriente

4.2.9.1. Por cálculo

El cálculo se basa en la suposición de que las barras de los rotores son rectangulares. Para la mayoría de los casos prácticos, la exactitud de este procedimiento es suficiente.

Para determinar la altura estimada de la barra del conductor del rotor se utiliza (4.10), mientras que los valores de H se obtienen de la NTC 3924-1996 [13].

$$h = \left(0,21 - \frac{2p}{100}\right) \times \frac{H}{1000} \quad (4.10)$$

4.2.9.2. Por medición

Se deben repetir a diferentes frecuencias de alimentación. Se recomienda usar al menos tres frecuencias (frecuencia nominal, la mitad de la frecuencia y un cuarto de la frecuencia nominal).

Para cada una de las corrientes de línea medidas, los valores de inductancia de dispersión se deben graficar contra la frecuencia y se debe tener una curva para extrapolar la inductancia a $f_{rotor} = 0$.

4.2.10. Inductancia magnetizante L_m y tensión U_m

Para cada una de las corrientes magnetizantes I_m determine la inductancia total del estator L_{ts} y calcule la inductancia de dispersión total correspondiente L_σ mediante interpolación de los valores lineales determinados con la corriente de fase I_s . La inductancia magnetizante L_m llega ser la presentada en (4.11).

$$L_m = L_{ts} - L_s = L_{ts} - \frac{L_\sigma}{1 + 1/K_\sigma} \quad (4.11)$$

Para determinar la tensión magnetizante se utiliza la ecuación (4.12).

$$U_m = 2\pi \times f_N \times L_m \times I_m \quad (4.12)$$

4.2.11. Inductancia de dispersión del rotor y del estator L_s y L'_r

Para cada uno de los valores determinados de inductancia del estator L_{ts} , inductancia de dispersión total L_σ e inductancia magnetizante L_m , las inductancias de dispersión llegan a ser las que se muestran en (4.13).

$$L_s = L_{ts} - L_m \quad (4.13)$$

4.2.12. Inductancia para cálculos a flujo constante (carga nominal)

Para cálculos simplificados, en muchas aplicaciones se supone que las inductancias son constantes. En este caso, las inductancias se deben dar para la operación nominal. Se determina la corriente del estator para la operación nominal:

- En el caso de devanados en estrella (Y):

$$I_s = I_N \quad (4.14)$$

- En el caso de devanados en delta (Δ):

$$I_s = \frac{I_N}{\sqrt{3}} \quad (4.15)$$

Luego, se determina la tensión del estator:

$$U_S = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \quad (4.16)$$

Se calcula la tensión magnetizante utilizando las ecuaciones (4.17) a (4.19).

$$U_{ma} = U_S - I_S \times \left(\cos \varphi_N \times R_{S,25} + \sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} \times 2\pi \times f_N \times L_S \right) \quad (4.17)$$

$$U_{mb} = I_S \times \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} \times R_{S,25} - \cos \varphi_N \times 2\pi \times f_N \times L_S \right) \quad (4.18)$$

$$U_m = \sqrt{U_{ma}^2 + U_{mb}^2} \quad (4.19)$$

Y finalmente se determina la corriente a través de la inductancia de dispersión del rotor L'_r , como se muestra en (4.20).

$$I'_r = \sqrt{\left(\frac{U_{mb}}{2\pi \times f_N \times L_m} - I_S \times \cos \varphi_N \right)^2 + \left(I_S \times \sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} - \frac{U_{ma}}{2\pi \times f_N \times L_m} \right)^2} \quad (4.20)$$

4.2.13. Resistencia de la jaula del rotor R'_r referida al devanado del estator

A partir del ensayo con carga se obtiene el deslizamiento como se presenta en (4.21).

$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} \quad (4.21)$$

Se determina la tensión y la corriente del estator como:

- En el caso de devanados conectados en estrella (Y)

$$U_S = \frac{U}{\sqrt{3}} ; I_S = I \quad (4.22)$$

- En el caso de devanados conectados en delta (Δ)

$$U_S = U ; I_S = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4.23)$$

Luego, se determina el factor de potencia como se muestra en (4.8).

Adicionalmente y considerando el efecto de la temperatura, se calcula la tensión magnetizante utilizando las ecuaciones (4.24), (4.25) y (4.19).

$$U_{ma} = U_S - I_S \times \left(\cos \varphi \times R_{S,25} \times \frac{K_S + \theta_L}{K_S + 25} + \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} \times 2\pi \times f_N \times L_S \right) \quad (4.24)$$

$$U_{mb} = I_S \times \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} \times R_{S,25} \times \frac{K_S + \theta_L}{K_S + 25} - \cos \varphi \times 2\pi \times f_N \times L_S \right) \quad (4.25)$$

También, se determina la corriente del rotor como en (4.26).

$$I_r' = \sqrt{\left(\frac{U_{mb}}{2\pi \times f_N \times L_m} - I_S \times \cos \varphi \right)^2 + \left(I_S \times \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \frac{U_{ma}}{2\pi \times f_N \times L_m} \right)^2} \quad (4.26)$$

Y se determina la impedancia del motor aplicando las expresiones (4.6) o (4.7), según la conexión del devanado.

Se determina la reactancia del motor:

$$X = Z \times \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} \quad (4.27)$$

Por último, se determinan las reactancias como se muestra en las ecuaciones (4.28) a (4.30).

$$X_r' = 2\pi \times f_N \times L_r' \quad (4.28)$$

$$X_S = 2\pi \times f_N \times L_S \quad (4.29)$$

$$X_m = 2\pi \times f_N \times L_m \quad (4.30)$$

Finalmente, se calcula la resistencia del rotor referida al devanado del estator y corregida a una temperatura de 25°C según se presenta en la ecuación (4.31).

$$R'_{r,25} = s \times (X'_r + X_m) \times \sqrt{\frac{X'_r \times X_m - (X - X_s)}{X'_r + X_m}} \times \frac{K_r + 25}{K_r + \theta_L} \quad (4.31)$$

4.3. Cálculo de los parámetros del motor de inducción

Siguiendo la norma técnica colombiana para la parametrización de motores de inducción trifásicos de jaula de ardilla, se procede a obtener los parámetros de estos motores en LabVolt™ y en el grupo de trabajo número 4 de dicho laboratorio.

4.3.1. Motor de jaula de ardilla de 4 polos de LabVolt™

Prueba de CD:

Esta prueba se realiza siguiendo el procedimiento establecido en la sección 4.2.3 para la medición de la resistencia de los devanados del estator. Para lo cual primero se pone en marcha el motor desde vacío hasta plena carga por un tiempo aproximado de 3 minutos, hasta alcanzar un punto de temperatura constante en el entrehierro del motor, la cual se obtiene mediante la utilización de la termocupla asociada al multímetro Promax® del almacén. Una vez se alcanza esta temperatura, se procede a tomar los datos de tensión, corriente y temperatura según lo establecido en la NTC 2805-2005 [14]. Las mediciones se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Mediciones de los devanados del motor de LabVolt™ en CD.

DC (conexión en Y)		
Tensión [V]	Corriente [A]	Temperatura [°C]
15.76	1.2	43
15.85	1.2	43.1
15.87	1.2	43.6

NOTA: La temperatura antes de la prueba de CD es de 38.8°C.

Con estos valores se utiliza la expresión (3.7) para calcular la resistencia $R_{II,m}$ y luego se utiliza la expresión (4.1) de la sección 4.2.5 para obtener el valor de $R_{S,25}$ a una temperatura de referencia de 25°C.

$$R_{II,m} = 6.1623 \, \Omega \quad \text{y} \quad R_{S,25} = 5.8261 \, \Omega$$

Prueba de vacío:

Se realiza el procedimiento de la sección 4.2.2.1, pero desacoplando la carga mecánica en el eje de la máquina. Los resultados de esta prueba se observan en la Tabla 15. En la Figura 14 se muestra la disposición de los equipos de medición para la realización de esta prueba.

Figura 14. Realización de la prueba sin carga del motor del grupo 4.



Fuente: Imagen propia tomada en el laboratorio.

Tabla 15. Mediciones de la prueba de vacío para el motor de LabVolt™.

Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W _{3φ}]	Temperatura [°C]	Velocidad [rpm]
203.1	0.68	-50	40	1796
190.8	0.63	-43	39.6	1797
173.5	0.57	-34	39.2	1793
162.6	0.53	-28	38.9	1795
146.8	0.47	-23	38.6	1793
135.8	0.42	-19	38.2	1791
117.9	0.38	-13	37.8	1790
100.3	0.33	-9	37.6	1785
80.2	0.27	-5	37.1	1777
62.9	0.24	-3	36.9	1760

La temperatura promedio durante la realización de este ensayo es $\theta_{NL} = 37.871^{\circ}\text{C}$.

Prueba de rotor bloqueado:

Luego se bloquea el rotor del motor y se toman nuevamente los valores de tensión, corriente, potencia y frecuencia. Esta prueba se realiza incrementando la tensión de alimentación de modo que se obtengan valores de corriente entre el 10% y el 150% de la corriente nominal, tal como se muestra en la Tabla 16.

Para este ensayo se utilizó el generador síncrono del grupo 5 del laboratorio (Figura 15), para obtener una alimentación controlada en tensión y frecuencia en CA para la prueba de rotor bloqueado del motor de inducción del grupo 4.

Figura 15. Encendido del motor del grupo 5.



Fuente: Imagen propia tomada en el laboratorio.

Tabla 16. Mediciones de la prueba de rotor bloqueado para el motor de LabVolt™.

Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W _{3φ}]	Frecuencia [Hz]	Velocidad [rpm]
87.4	1.8	49	60	0
80.5	1.6	40	59.9	0
72.5	1.4	30	60	0
63.8	1.2	21	60	0
55.36	1	13	60.1	0
46.34	0.8	7	60	0
39.66	0.6	4	60	0
35.01	0.5	2	60.1	0
29.5	0.4	1	60	0
24.04	0.24	0	59.9	0

Aplicación de la norma siguiendo los anexos:

La norma presenta al final del documento unas tablas donde se resume todo el procedimiento descrito en este capítulo. Los resultados de dichos anexos se muestran en la

Tabla 17 a la Tabla 22, utilizando los ajustes de curva para la extrapolación de la Figura 16. Además se utiliza para los diferentes cálculos las constantes del motor:

$$R_{S,25} = 5.8261 \Omega; f_N = 60 \text{ Hz}; 2p = 4 \text{ polos}; H = 71 \text{ mm}; K_\sigma = 1; \gamma_r = 33E6 \text{ S/m.}$$

Tabla 17. Parámetros calculados usando los valores de la Tabla 15.

ANEXO A							
U [V]	I [A]	P1 [W]	Is [A]	Pk [W]	U ² [V ²]	Pfe [W]	Rfe [Ω]
203.1	0.68	38	0.68	29.52	41249.61	26.92	1532.28
190.8	0.63	33	0.63	25.72	36404.64	23.12	1574.47
173.5	0.57	28	0.57	22.04	30102.25	19.44	1548.26
162.6	0.53	27	0.53	21.85	26438.76	19.25	1373.46
146.8	0.47	22	0.47	17.95	21550.24	15.35	1403.89
135.8	0.42	20	0.42	16.76	18441.64	14.17	1301.76
117.9	0.38	17	0.38	14.35	13900.41	11.75	1182.64
100.3	0.33	14	0.33	12.00	10060.09	9.40	1069.67
80.2	0.27	11	0.27	9.66	6432.04	7.07	910.38
62.9	0.24	8	0.24	6.94	3956.41	4.35	910.38

Dónde: $P_{fw} = 2.597 \text{ W}$, y de aquí aplicando (4.5) se calcula $R_{fe} = 1280.719 \Omega$.

Tabla 18. Parámetros calculados usando los valores de la Tabla 16.

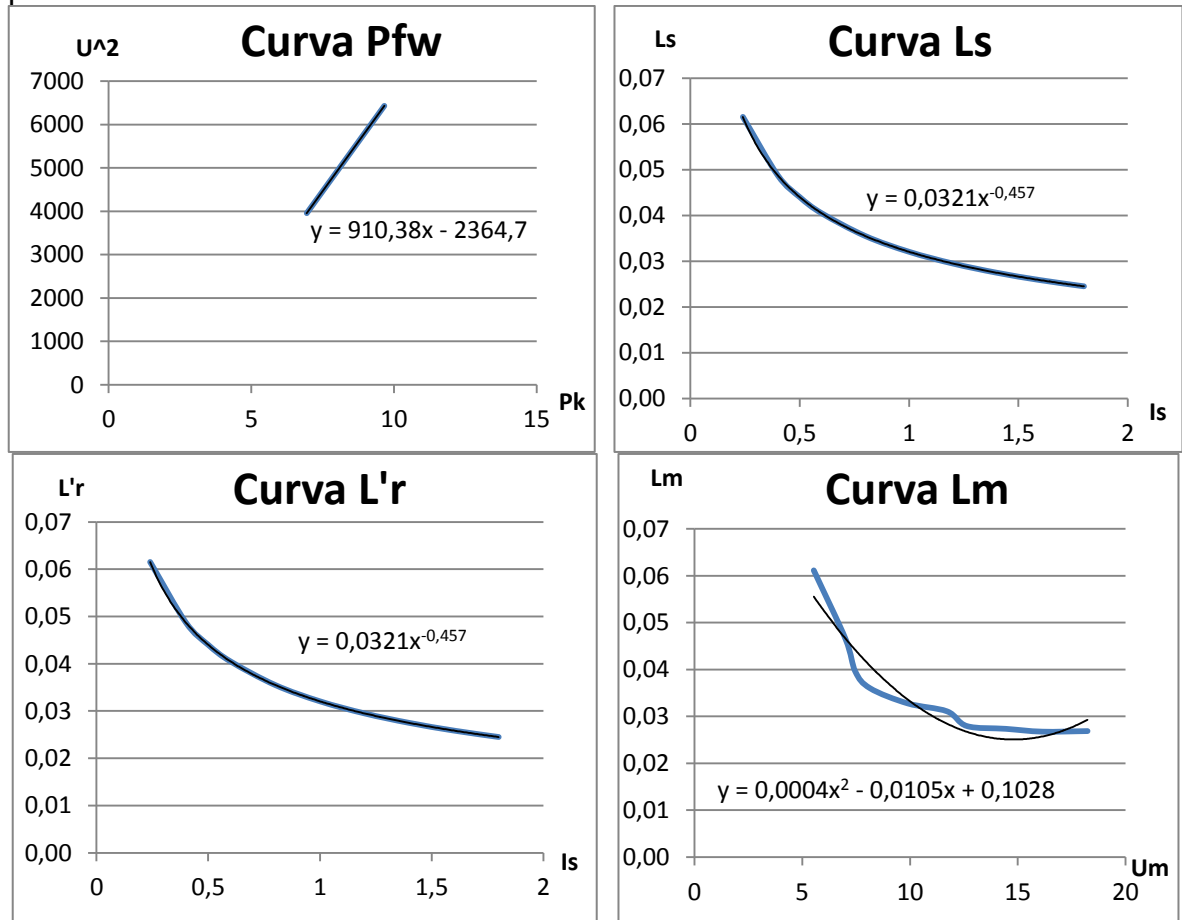
ANEXO B								
U [V]	I [A]	P1 [W]	Z [Ω]	cos(φ)	R [Ω]	Im [A]	Xts [Ω]	Lts [H]
87.4	1.8	197	28.034	0.723	20.267	1.8	19.368	0.0514
80.5	1.6	163	29.048	0.731	21.224	1.6	19.832	0.0526
72.5	1.4	127	29.898	0.722	21.599	1.4	20.674	0.0548
63.8	1.2	94	30.696	0.709	21.759	1.2	21.651	0.0574
55.36	1	64	31.962	0.667	21.333	1	23.801	0.0631
46.34	0.8	41	33.443	0.639	21.354	0.8	25.738	0.0683
39.66	0.6	27	38.163	0.655	25.000	0.6	28.834	0.0765
35.01	0.5	19	40.426	0.627	25.333	0.5	31.504	0.0836
29.5	0.4	11	42.580	0.538	22.917	0.4	35.887	0.0952
24.04	0.24	6	57.831	0.600	34.722	0.24	46.247	0.1227

Para continuar, se requiere de calcular los valores de $h = 0.01207 \text{ m}$ de (4.10), $\xi = 1.067$ y $K_i = 0.969$.

Tabla 19. Parámetros de dispersión a partir de los datos de la Tabla 16.

ANEXO C									
U [V]	I [A]	P1 [W]	Z [Ω]	cos(φ)	R [Ω]	Is [A]	Xσa [Ω]	Lσa [H]	Lσ [H]
103.2	3.81	344.9	15.6385	0.5064	7.9199	3.81	13.485	0.0358	0.0363
95.7	3.44	285	16.0618	0.4998	8.0280	3.44	13.912	0.0369	0.0375
85.4	2.94	210.5	16.7707	0.4840	8.1178	2.94	14.675	0.0389	0.0395
76.7	2.53	157.5	17.5031	0.4686	8.2020	2.53	15.462	0.0410	0.0417
72	2.31	132.3	17.9953	0.4593	8.2645	2.31	15.985	0.0424	0.0431
63.2	1.91	91.5	19.1039	0.4376	8.3605	1.91	17.177	0.0456	0.0463
45.7	1.15	34.3	22.9434	0.3768	8.6452	1.15	21.252	0.0564	0.0573
36.4	0.76	16.4	27.6520	0.3423	9.4645	0.76	25.982	0.0689	0.0700
30.1	0.52	8.5	33.4197	0.3135	10.4783	0.52	31.735	0.0842	0.0855
21.2	0.24	2.8	50.9993	0.3177	16.2037	0.24	48.357	0.1283	0.1303

Figura 16. Curvas para la interpolación y extrapolación de valores según la norma para el motor de LabVolt™.



Fuente: Gráficos realizados en Microsoft Excel con información propia.

Tabla 20. Corrección de los parámetros calculados en la Tabla 18 y Tabla 19.

I_m [A]	L_{ts} [H]	L_{σ} [H]	L_m [H]	L_s [H]	L'_r [H]	U_m [V]
1,8	0,0514	0,0490	0,0269	0,0245	0,0245	18,24
1,6	0,0526	0,0517	0,0268	0,0259	0,0259	16,14
1,4	0,0548	0,0550	0,0274	0,0275	0,0275	14,44
1,2	0,0574	0,0590	0,0279	0,0295	0,0295	12,64
1	0,0631	0,0641	0,0311	0,0321	0,0321	11,72
0,8	0,0683	0,0710	0,0328	0,0355	0,0355	9,89
0,6	0,0765	0,0810	0,0360	0,0405	0,0405	8,14
0,5	0,0836	0,0880	0,0396	0,0440	0,0440	7,46
0,4	0,0952	0,0974	0,0465	0,0487	0,0487	7,01
0,24	0,1227	0,1231	0,0611	0,0615	0,0615	5,53

Finalmente y utilizando las curvas de ajuste de la Figura 16, se calcula el valor de L_s y L'_r para la corriente nominal I_N , y se calcula el valor de L_m para la tensión obtenida U_m , como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Resultados de los cálculos siguiendo el procedimiento 7.8 de la norma.

$\cos\phi_{IN}$ =	0,79
$I_s = I_N$	1,2
L_s =	0,0295
U_s =	120,089
U_{ma} =	106,374
U_{mb} =	-6,269
U_m =	106,559
L_m =	3,5258
I'_r =	1,157
L'_r =	0,0300

Y se repite el procedimiento anterior para operación a plena carga, como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22. Resultados de los cálculos siguiendo el procedimiento 7.9 de la norma.

n_s =	1800
n =	1646
s =	0,0856
P_1 =	360
$\cos\phi_{IL}$ =	0,833
θ_L =	36,5
U_{ma} =	106,130
U_{mb} =	-6,079
U_m =	106,304
L_m =	3,5068
I'_r =	1,161
L'_r =	0,0300
Z =	100,074
X =	55,411
X'_r =	11,301
X_s =	11,134
X_m =	132,921
R'_r25 =	17,590

4.3.2. Grupo de trabajo número 4

Se repite el mismo procedimiento del caso del motor de LabVolt™, pero esta vez en el motor de inducción trifásico del grupo 4 del laboratorio de máquinas.

Prueba de CD:

Se obtienen las mediciones de la Tabla 23, considerando que la temperatura antes de la prueba de CD es de 34.7°C, cumpliendo con el requerimiento de temperatura descrito en la sección 4.2.2.1.

Tabla 23. Mediciones de los devanados del motor del grupo 4 en CD.

DC (conexión en Y)		
Tensión [V]	Corriente [A]	Temperatura [°C]
14,51	8,4	39,3
14,56	8,4	39,6
14,36	8,4	39,7

Con estos valores se utiliza la expresión (3.7) para calcular la resistencia $R_{II,m}$ y luego se utiliza la expresión (4.1) de la sección 4.2.5 para obtener el valor de $R_{S,25}$ a una temperatura de referencia de 25°C.

$$R_{II,m} = 0.8161 \Omega \quad \text{y} \quad R_{S,25} = 0.7957 \Omega$$

Prueba de vacío:

Se deja girar libremente el eje del conjunto motor-generador del grupo 4 y se toman las respectivas mediciones, tal como se realizó para el módulo de LabVolt™.

Tabla 24. Mediciones de la prueba de vacío para el motor del grupo 4.

Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W _{3φ}]	Temperatura [°C]	Velocidad [rpm]
209	4,4	236	31,9	1794
208	4,3	235	31,9	1797
208	4,3	233	31,7	1793
208,5	5,3	233	31,6	1797
205	4	226	31,6	1800
191	3,6	208	31,6	1800
176,5	3,2	198	31,6	1800
166	3,1	182	31,6	1800
151	2,9	173	31,6	1800
143	2,8	167	31,6	1800
127	2,6	156	31,6	1800

La temperatura promedio durante la realización de este ensayo es $\theta_{NL} = 31.664^\circ\text{C}$

Prueba de rotor bloqueado:

Se bloquea el eje del conjunto del grupo 4 y se incrementa levemente la tensión de alimentación del motor hasta obtener las mediciones de corriente desde el 10% hasta el 150%.

Tabla 25. Mediciones de la prueba de rotor bloqueado para el motor del grupo 4.

Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W _{3φ}]	Frecuencia [Hz]	Velocidad [rpm]
72	12	820	59,5	0
69	10	673	59,9	0
59,5	9	528	60	0
53,2	8	419	59,8	0
48,6	7,2	340	60	0
43,5	6,4	264	59,9	0
38,8	5,6	203	60	0
34,8	5	156	60	0
31,2	4,4	121	60,1	0
27,4	3,8	89	60,1	0

Aplicación de la norma siguiendo los anexos:

Los resultados de implementar los anexos que se encuentran al final de la norma NTC 5642-2008 [3] se muestran en la Tabla 26 a la Tabla 22, utilizando los ajustes de curva para la extrapolación de la Figura 17. Además se utiliza para los diferentes cálculos las constantes del motor:

$$R_{S,25} = 0.7957\Omega; f_N = 60 \text{ Hz}; 2p = 4 \text{ polos}; H = 90 \text{ mm}; K_\sigma = 0.67; \gamma_r = 56E6 \text{ S/m.}$$

Tabla 26. Parámetros calculados usando los valores de la Tabla 24.

ANEXO A							
U [V]	I [A]	P1 [W]	I _s [A]	P _k [W]	U ² [V ²]	P _{fe} [W]	R _{fe} [Ω]
209	4,4	236	4,4	188,60	43681,00	80,48	542,79
208	4,3	235	4,3	189,73	43264,00	81,61	530,16
208	4,3	233	4,3	187,73	43264,00	79,61	543,48
208,5	5,3	233	5,3	164,23	43472,25	56,10	774,88
205	4	226	4	186,83	42025,00	78,70	533,98
191	3,6	208	3,6	176,27	36481,00	68,14	535,35
176,5	3,2	198	3,2	172,93	31152,25	64,80	480,72
166	3,1	182	3,1	158,47	27556,00	50,35	547,34
151	2,9	173	2,9	152,41	22801,00	44,28	514,89
143	2,8	167	2,8	147,81	20449,00	39,68	515,36
127	2,6	156	2,6	139,45	16129,00	31,32	514,93

Dónde: $P_{fw} = 108.127 \text{ W}$, y de aquí aplicando (4.5) se calcula $R_{fe} = 551.897 \Omega$.

Tabla 27. Parámetros calculados usando los valores de la Tabla 25.

ANEXO B								
U [V]	I [A]	P1 [W]	Z [Ω]	cos(φ)	R [Ω]	Im [A]	Xts [Ω]	Lts [H]
72	12	820	3,464	0,548	1,898	12	2,898	0,0077
69	10	673	3,984	0,563	2,243	10	3,292	0,0087
59,5	9	528	3,817	0,569	2,173	9	3,138	0,0083
53,2	8	419	3,839	0,568	2,182	8	3,159	0,0084
48,6	7,2	340	3,897	0,561	2,186	7,2	3,226	0,0086
43,5	6,4	264	3,924	0,547	2,148	6,4	3,284	0,0087
38,8	5,6	203	4,000	0,539	2,158	5,6	3,368	0,0089
34,8	5	156	4,018	0,518	2,080	5	3,438	0,0091
31,2	4,4	121	4,094	0,509	2,083	4,4	3,524	0,0093
27,4	3,8	89	4,163	0,494	2,054	3,8	3,621	0,0096

Para continuar, se requiere de calcular los valores de $h = 0.0153$ m de (4.10), $\xi = 1.762$ y $K_i = 0.823$.

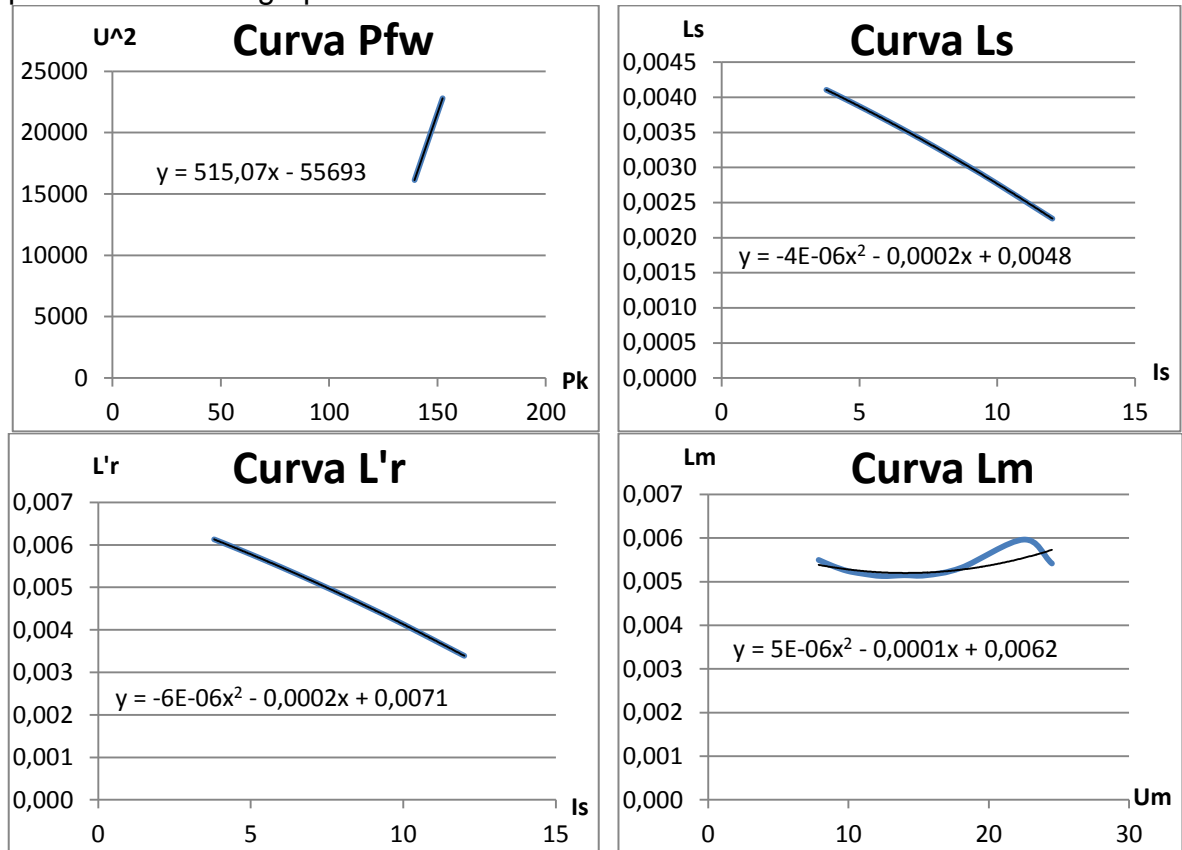
Tabla 28. Parámetros de dispersión a partir de los datos de la Tabla 25.

ANEXO C									
U [V]	I [A]	P1 [W]	Z [Ω]	cos(φ)	R [Ω]	Is [A]	Xσa [Ω]	Lσa [H]	Lσ [H]
72	12	820	3,464	0,548	1,898	12	2,898	0,0077	0,0086
69	10	673	3,984	0,563	2,243	10	3,292	0,0087	0,0098
59,5	9	528	3,817	0,569	2,173	9	3,138	0,0083	0,0093
53,2	8	419	3,839	0,568	2,182	8	3,159	0,0084	0,0094
48,6	7,2	340	3,897	0,561	2,186	7,2	3,226	0,0086	0,0096
43,5	6,4	264	3,924	0,547	2,148	6,4	3,284	0,0087	0,0097
38,8	5,6	203	4,000	0,539	2,158	5,6	3,368	0,0089	0,0100
34,8	5	156	4,018	0,518	2,080	5	3,438	0,0091	0,0102
31,2	4,4	121	4,094	0,509	2,083	4,4	3,524	0,0093	0,0105
27,4	3,8	89	4,163	0,494	2,054	3,8	3,621	0,0096	0,0107

Tabla 29. Corrección de los parámetros calculados en la Tabla 27 y Tabla 28.

Im [A]	Lts [H]	Lσ [H]	Lm [H]	Ls [H]	L'r [H]	Um [V]
12	0,0077	0,0057	0,0054	0,0023	0,0034	24,50
10	0,0087	0,0069	0,0060	0,0028	0,0041	22,48
9	0,0083	0,0075	0,0053	0,0030	0,0045	18,05
8	0,0084	0,0081	0,0051	0,0032	0,0048	15,52
7,2	0,0086	0,0085	0,0051	0,0034	0,0051	13,97
6,4	0,0087	0,0089	0,0051	0,0036	0,0053	12,37
5,6	0,0089	0,0093	0,0052	0,0037	0,0056	10,95
5	0,0091	0,0097	0,0052	0,0039	0,0058	9,89
4,4	0,0093	0,0099	0,0054	0,0040	0,0060	8,89
3,8	0,0096	0,0102	0,0055	0,0041	0,0061	7,88

Figura 17. Curvas para la interpolación y extrapolación de valores según la norma para el motor del grupo 4.



Fuente: Gráficos realizados en Microsoft Excel con información propia.

Finalmente y utilizando las curvas de ajuste de la Figura 17, se calcula el valor de L_s y L'_r para la corriente nominal I_N , y se calcula el valor de L_m para la tensión obtenida U_m , como se muestra en la Tabla 30.

Tabla 30. Resultados de los cálculos siguiendo el procedimiento 7.8 de la norma.

cosphiN=	0,82
$I_s = I_N$	8,4
Ls=	0,0028
Us=	120,089
Uma=	109,465
Umb=	-3,543
Um=	109,522
Lm=	0,0552
$I'r$ =	7,073
$L'r$ =	0,0054

Y se repite el procedimiento anterior para operación a plena carga, como se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31. Resultados de los cálculos siguiendo el procedimiento 7.9 de la norma.

ns=	1800
n=	1671
s=	0,0717
P1=	2499
cosphiL=	0,826
theta L=	32,4
Uma=	109,309
Umb=	-3,434
Um=	109,363
Lm=	0,0551
l'r=	7,122
L'r=	0,0054
Z=	14,296
X=	8,063
X'r=	2,025
Xs=	1,070
Xm=	20,819
R'r25=	0,971

4.4. Análisis comparativo de los resultados

Para finalizar, se realizar una comparación de los parámetros de la máquina calculados aplicando los procedimientos especificados en los capítulos 3 y 4 de este documento. Para esta comparación se sigue la expresión porcentual (4.32).

$$Diferencia[\%] = \frac{Valor_{norma} - Valor_{guía}}{Valor_{guía}} \times 100\%$$

Esta expresión de diferencia considera la relación entre el resultado obtenido siguiendo la norma con respecto al obtenido siguiendo la guía de laboratorio. Los resultados de esta comparación se presentan en la Tabla 32 y la Tabla 33.

Tabla 32. Comparación porcentual de los parámetros para el motor de LabVolt™.

	Valor guía	Valor norma	Diferencia
Rs	6,595	5,8261	-11,66
Xs	12,548	11,134	-11,27
R'r	13,755	17,590	27,88
X'r	12,548	11,301	-9,94
Rc = Rfe	906,409	1280,719	41,30
Xm	155,265	132,921	-14,39

Puede notarse como para el motor de LabVolt™ la mayor diferencia de los parámetros sólo se refleja en el caso de las resistencias R'_r y R_{fe} . Esta diferencia puede deberse principalmente a la inclusión de la temperatura en los cálculos de la norma, lo cual refleja un incremento en el valor real de la resistencias en la operación del motor.

Tabla 33. Comparación porcentual de los parámetros para el motor del grupo 4.

	Valor guía	Valor norma	Diferencia
Rs	0,862	0,7957	-7,69
Xs	1,036	1,070	3,28
R'r	0,910	0,971	6,70
X'r	2,418	2,025	-16,25
Rc = Rfe	249,37	551,897	121,32
Xm	28,176	20,819	-26,11

Para el caso del motor del grupo 4, se repite el efecto presentado en el motor de LabVolt™ y también se observa como la reactancia de magnetización presenta una reducción con respecto al cálculo con las guías. Esto se puede deber en este caso particular, al error que se presentó en la resistencia R_{fe} , la cual está incluida en los cálculos para obtener el valor del parámetro X_m .

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones generales

Como conclusiones se puede decir, que las pruebas realizadas con la norma NTC 5642-2008, que se realizó en el laboratorio de máquinas eléctricas la cual fue determinar los parámetros del motor de inducción trifásico de jaula de ardilla, e implementando la guía de trabajo del laboratorio máquinas y realizar las pruebas de parametrización a los motores de inducción trifásico jaula de ardilla de LabVolt™ y del grupo de trabajo 4 de dicho laboratorio, de acuerdo con los resultados obtenidos se concluye que haciendo las pruebas utilizando la NTC 5642-2008, se obtuvo unos buenos resultados y una mayor exactitud al realizar las prácticas en el laboratorio, el margen de error es muy pequeño de acuerdo a las pruebas realizadas según las guías del laboratorio.

Para los estudiantes de la Universidad Tecnológica de Pereira, en especial los del programa de tecnología eléctrica, serán los beneficiados con la implementación de esta norma NTC 5642-2008 en Laboratorio Máquinas Eléctricas, cuando deseen realizarlas pruebas tendrán unos resultados más exactos y más eficientes para hallar los parámetros del motor de inducción trifásico.

Al realizarse las pruebas, se pudo observar que hay problemas con los equipos de medida, ya que prácticamente el laboratorio de máquinas eléctricas, es utilizado a diario por los estudiantes y al manejar los instrumentos de medida no los utilizan de un modo adecuado, y al hacer las pruebas se muestra unos resultados que no concuerdan totalmente según los cálculos obtenidos.

5.2. Recomendaciones

Antes de realizar las pruebas se recomienda verificar que los equipos que se utilizan en el laboratorio de máquinas eléctricas hayan tenido un adecuado mantenimiento preventivo, como son los motores y los arrancadores, que son utilizados a diario y con el tiempo pierden su buen funcionamiento.

Esta misma recomendación aplica para los instrumentos de medida, puesto que normalmente no están en óptimas condiciones para hacer una prueba con exactitud. Es necesaria una certificación de calibración para tal fin.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. J. CHAPMAN, Máquinas Eléctricas, 4 Ed ed., España: McGraw-Hill, 2005.
- [2] B. S. GURU y H. R. HIZIRUGLU, Máquinas Eléctricas y Transformadores, 3 Ed ed., México: Oxford University Press, 2003.
- [3] ICONTEC, Norma Técnica Colombiana NTC 5642-2008, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)., 2008.
- [4] ICONTEC;, Norma Técnica Colombiana NTC 5611-2002, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)., 2002.
- [5] IEEE;, Estándar IEEEStd 112-2004, Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2004.
- [6] NEMA;, NEMA MG 1-2003, A. p. A. N. S. Institute, Ed., National Electrical Manufacturers Association, 2003.
- [7] IEC, IEC 60034-28, 2010.
- [8] WIKIPEDIA, «Wikipedia, The Free Encyclopedia: Motor asíncrono,» 15 08 2012. [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_as%C3%ADncrono. [Último acceso: 08 11 2012].
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] D. E. Rodas R., A. Suarez M. y F. A. Ocampo M., Libro guía para laboratorio unificado de máquinas (CD Y CA), Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.
- [13] ICONTEC;, Norma Técnica Colombiana NTC 3924-1996, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)., 1996.
- [14] ICONTEC, Norma Técnica Colombiana NTC 2805-2005, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)., 2005.
- [15] ICONTEC;, Norma Técnica Colombiana NTC 3504-2000, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)., 2000.
- [16] WORDREFERENCE.COM, «Online Language Dictionaries,» 2012. [En línea]. Available: <www.wordreference.com/definicion>. [Último acceso: 16 11 2012].

- [17] V. B. GanttProject, *Software para la elaboracion de proyectos y mantenimiento*, 2013.
- [18] S. M. González, «Guía de laboratorio que articula la teoria y la practica de las máquinas eléctricas de corriente continua,» de *Guía de laboratorio que articula la teoria y la practica de las máquinas eléctricas de corriente continua*, Pereira, Universidad Tecnológica de Pereira, 1990.
- [19] J. R. N. Ramírez, «Guia de laboratorio de circuitos eléctricos, de la facultad de Ingenieria Eléctrica,Electrónica, Física y Ciencias de Computación,» Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2005.
- [20] Motores eléctricos, «www.mcgraw-hill.es,» [En línea]. Available: <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448173104..> [Último acceso: 21 03 2013].
- [21] SLIDESHARE, «SlideShare Inc.,» [En línea]. Available: <http://es.slideshare.net/johnflorestapia/frenado-de-motores-elctricos-trifsicos>. [Último acceso: 15 3 2013].
- [22] 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].