

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

COMPARACIÓN ENTRE LA METODOLOGÍA DE ENSAYOS PROPUESTOS POR LAS NORMAS INTERNACIONAL IEC Y LA NORMA ANSI/IEEE PARA CARACTERIZAR LAS MÁQUINAS ASINCRÓNICAS

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Ciardiello Riera, Giampaolo
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

COMPARACIÓN ENTRE LA METODOLOGÍA DE ENSAYOS PROPUESTOS POR LAS NORMAS INTERNACIONAL IEC Y LA NORMA ANSI/IEEE PARA CARACTERIZAR LAS MÁQUINAS ASINCRÓNICAS

Tutor Académico: Pérez, Julián.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Ciardiello Riera, Giampaolo
para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Caracas, 2012

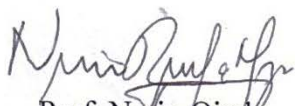
CONSTANCIA DE APROBACIÓN


Caracas, 29 de mayo de 2012


Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Giampaolo Ciardiello R., titulado:

**“COMPARACIÓN ENTRE LA METODOLOGÍA DE ENSAYOS
PROPUESTOS POR LAS NORMAS INTERNACIONALES IEC Y LA
NORMA ANSI/IEEE PARA CARACTERIZAR LAS MÁQUINAS
ASINCRÓNICAS”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención Potencia, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.


Prof. Nerio Ojeda
Jurado


Prof. Alexander Cepeda
Jurado


Prof. Julián Pérez
Prof. Guía

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis pilares fundamentales, por las personas que sería capaz de demoler lo que fuera con mis propias manos, las que de alguna manera hacen que tenga sentido mis propósitos, las dos mujeres que me enorgullecen mi madre Juana B, Riera de Ciardiello. Y la mujer de mi vida Alejandra C, Piñango C. muchas gracias a ambas.

AGRADECIMIENTOS

Para empezar dirijo mi principal agradecimiento a aquel ser superior, padre de nuestra realidad, el único que sabe el porqué de las cosas Dios, segundo agradezco a mí madre por darme las enseñanzas morales de la vida, por ser mi apoyo y un ejemplo a seguir, a mi familia por ser los compañeros que a pesar de los problemas queda alguna enseñanza y que además los quiero, mi padre y hermanos, Maribel y Giancarlo. A mí pareja Alejandra C, Piñango C. por ser ese complemento, esa visión distinta ante la adversidad y por brindarme esa alegría tan brillante en el sentimiento humano que llaman amor. También todas aquellas personas que representan una amistad que agradezco, una mano amiga, con las cuales no solo se comparte una cerveza sino varias, o un conocimiento académico, ellos también nos enseñan a ser mejores, a evolucionar, aprender, valorar y a ser valorado, ellos son en orden alfabético:

Prof. Alexander Cepeda.	Ing. Gabriel Gallo e hijo.	Prof. Napoleón Malpica.
Arisbell Guilarte.	Gabriela Chacón.	Piñango (flia. completa).
Carmen A.	Ing. Héctor González.	Prof. Rafael Malpica.
Lic. Cesar Graterol.	Prof. Julián Pérez.	Prof. Raúl Arreaza.
Cynthia Valderrama.	Prof. Lorena Nuñez.	Ing. Rigel Rangel.
Ing. Doménico Cante.	Ing. Martín Ramos.	

Y a todos aquellos amigos que han tomado distintos caminos,
Gracias.

Ciardiello R, Giampaolo.

**COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS DE ENSAYOS
PROPUESTOS POR LAS NORMAS INTERNACIONAL IEC Y LA
NORMA ANSI/IEEE PARA CARACTERIZAR LAS MÁQUINAS
ASINCRÓNICAS**

**Tutor académico: Pérez, Julián. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Eléctrica. Opción: Potencia. Institución: U.C.V. 2012.
181 h + anexos.**

Palabras Claves: Máquina asincrónica, prueba de motores, prueba de carga, vacío, prueba a rotor bloqueado, circuito equivalente, aumento de temperatura.

Resumen. Se realiza una comparación metodológica, cuantitativa y cualitativa entre las Normas IEC e IEEE, en lo que respecta a las pruebas pertinentes para la determinación del circuito equivalente de la máquina asincrónica además de presentar una metodología para la determinación y comprobación de la potencia nominal de la máquina asincrónica. Se reitera que los ensayos propuestos por las distintas organizaciones son de interés para el laboratorio y necesarios para tener una base de comparación entre las normas mencionadas. Además se determinó que los mismos son reproducibles en las instalaciones del laboratorio de máquinas eléctricas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UCV.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
CONSTANCIA DE APROBACIÓN _____	iii
DEDICATORIA _____	iv
AGRADECIMIENTOS _____	v
RESUMEN _____	vi
ÍNDICE GENERAL _____	vii
LISTA DE TABLAS _____	xiii
LISTA DE FIGURAS _____	xvii
SIGLAS _____	xix
ACRÓNIMOS _____	xx
INTRODUCCIÓN _____	1

CAPÍTULO I

<i>1.1 Planteamiento del problema</i> _____	3
<i>1.2 Objetivo general</i> _____	3
<i>1.3 Objetivos específicos</i> _____	3
<i>1.4 Metodología</i> _____	4

CAPÍTULO II

<i>2.1 Marco teórico</i> _____	6
2.1.1 Organizaciones de Normativas _____	6

2.1.1.1	La ANSI / IEEE	6
2.1.1.2	La IEC	8

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS CONSIDERADAS 11

3.1	<i>Condiciones generales de los ensayos</i>	11
3.1.1	Según la Norma IEEE Std 112-2004.	11
3.1.2	Según la Norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).	12
3.2	<i>Medición y Determinación de la Resistencia Estatórica</i>	13
3.2.1	Objetivos	15
3.2.2	Condiciones del ensayo	16
3.2.3	Instrumentos y equipos	17
3.2.3.1	Para método Amperímetro – Voltímetro	17
3.2.3.2	Para método del Amperímetro	18
3.2.3.3	Para medición directa con Óhmetro tipo puente	19
3.2.4	Procedimientos	19
3.2.4.1	Método Amperímetro – Voltímetro	19
3.2.4.2	Método del Amperímetro	20
3.2.4.3	Medición Directa con Óhmetro tipo puente	21
3.2.4.4	Cálculos para la determinación de la resistencia estática	22
3.3	<i>Prueba con carga variable.</i>	24
3.3.1	Objetivo	24
3.3.2	Condiciones del ensayo	24
3.3.3	Instrumentos y equipos	25
3.3.4	Procedimiento	26
3.4	<i>Prueba sin Carga o de Vacío</i>	28
3.4.1	Objetivo	28
3.4.2	Condición del ensayo	28

3.4.3 Instrumentos y equipos	28
3.4.4 Procedimiento	29
3.5 Prueba con Rotor Bloqueado	31
3.5.1 Objetivo	31
3.5.2 Condición del ensayo	31
3.5.3 Instrumentos y equipos	31
3.5.4 Procedimiento	32
3.5.4.1 Según la Norma IEEE Std 112-2004	33
3.5.4.2 Según la Norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008)	35
3.6 Métodos para la Determinación del Circuito Equivalente	36
3.6.1 Objetivo	36
3.6.2 Procedimiento	36
3.6.2.1 Según la Norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008)	36
3.6.2.2 Según la Norma IEEE Std 112-2004, Método 1	54

CAPÍTULO IV

APLICACIONES DE LAS PRUEBAS	62
4.1 Valores de placa de las máquina utilizadas para el estudio	62
4.2 Interpretación de los valores de placa de las máquinas asincrónicas seleccionadas como objetos de pruebas	64
4.3 Comprobación de las condiciones sobre la red de alimentación	67
4.3.1 Desbalance en tensión	68
4.3.2 Máxima desviación en frecuencia porcentual	69
4.4 Método Amperímetro – Voltímetro	71
4.4.1 Diagrama de conexiones	71
4.4.2 Condiciones del ensayo	71
4.4.3 Instrumentos y equipos, disponibles en el LME	72

4.4.4	Datos experimentales y determinaciones _____	73
4.5	<i>Método del Amperímetro</i> _____	76
4.5.1	Diagrama eléctrico _____	76
4.5.2	Condiciones del ensayo _____	77
4.5.3	Instrumentos y equipos, disponibles en el LME _____	77
4.5.4	Datos experimentales y determinaciones _____	78
4.6	<i>Medición por óhmetro tipo puente</i> _____	81
4.6.1	Puente de Kelvin-Thomson _____	81
4.6.1.1	Diagrama de conexiones _____	81
4.6.1.2	Instrumentos y equipos, disponibles en el LME _____	82
4.6.1.3	Datos experimentales y determinaciones _____	82
4.6.2	Puente de Wheatstone _____	84
4.6.2.1	Diagrama de conexiones _____	84
4.6.2.2	Instrumentos y equipos, disponibles en el LME _____	84
4.6.2.3	Datos experimentales y determinaciones _____	85
4.7	<i>Prueba con carga</i> _____	86
4.7.1	Diagrama de conexiones _____	86
4.7.2	Condiciones del ensayo _____	87
4.7.3	Instrumentos y equipos, disponibles en el LME _____	88
4.7.4	Datos experimentales y determinaciones _____	91
4.8	<i>Prueba en vacío</i> _____	93
4.8.1	Diagrama de conexiones _____	93
4.8.2	Condiciones del ensayo _____	94
4.8.3	Instrumentos y equipos, disponibles en el LME _____	94
4.8.4	Datos experimentales y determinaciones _____	95
4.9	<i>Prueba de rotor bloqueado</i> _____	97
4.9.1	Diagramas de conexiones _____	97
4.9.2	Condiciones del ensayo _____	100

4.9.3	Instrumentos y equipos, disponibles en el LME _____	100
4.9.4	Datos experimentales y determinaciones _____	105
4.10	<i>Determinación del circuito equivalente según la Norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) _____</i>	107
4.11	<i>Determinación del circuito equivalente según la Norma IEEE Std 112-2004, Método 1 _____</i>	112
4.12	<i>Determinación del Par inducido en la máquina jaula de ardilla en función de los parámetros del circuito equivalente _____</i>	116
4.12.1	Datos requeridos para la determinación _____	116
4.12.2	Metodología _____	116
4.12.3	Datos experimentales y determinaciones _____	118
4.13	<i>Observación, análisis y comparación de las pruebas y determinaciones _____</i>	119
4.13.1	En la medición de resistencia del estator _____	119
4.13.1.1	Observaciones _____	119
4.13.1.2	Comparación _____	120
4.13.2	En la prueba de carga _____	122
4.13.2.1	Observaciones y/o comparación _____	122
4.13.3	En la prueba de vacío _____	123
4.13.3.1	Observaciones y/o comparación. _____	123
4.13.4	En la prueba de rotor bloqueado _____	124
4.13.4.1	Observaciones y/o comparación _____	124
4.13.5	En la determinación del circuito equivalente _____	125
4.13.5.1	Observación y/o comparación _____	125
4.13.6	En la determinación del par inducido de la máquina _____	128
4.13.6.1	Observación y/o comparación _____	128
4.14	<i>Ensayos para la determinación de la potencia nominal y corriente a plena carga. _____</i>	129

4.14.1	Objetivo	129
4.14.2	Pruebas y determinaciones requeridas	130
4.14.3	Condiciones generales	130
4.14.4	Metodología	132
4.14.5	Diagramas de conexiones	133
4.14.5.1	Para la medición de resistencia	133
4.14.5.2	Para la prueba de aumento de temperatura y prueba de carga a tensión nominal	134
4.14.5.3	Para la prueba de vacío	135
4.14.5.4	Para la prueba de rotor bloqueado al 25 % de la frecuencia nominal	136
4.14.6	Instrumentos y equipos disponibles en el LME	136
4.14.6.1	Para la prueba de aumento de temperatura y prueba de carga a tensión nominal	136
4.14.6.2	Para la prueba de vacío	139
4.14.6.3	Para la prueba de rotor bloqueado al 25 % de la frecuencia nominal	140
4.14.7	Datos experimentales y determinaciones	142
CONCLUSIONES		150
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		152
BIBLIOGRAFÍA		154
ANEXO		155

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.2.1. Aplicación de métodos para la medición de resistencia	15
Tabla 4.1.1. Máquina asincrónica (rotor bobinado) (Roja).....	62
Tabla 4.1.2. Máquina sincrónica (Amarilla).	62
Tabla 4.1.3. Máquina DC (Azul).	63
Tabla 4.1.4. Máquina sincrónica (Amarilla)	63
Tabla 4.1.5. Máquina asincrónica rotor bobinado (Roja).	63
Tabla 4.1.6. Máquina asincrónica (jaula de ardilla) (Verde).....	64
Tabla 4.3.1. Mediciones de tensión sobre la red de alimentación.	68
Tabla 4.3.2. Datos de frecuencia sobre la red de alimentación.	70
Tabla 4.4.1. Mediciones para determinar la resistencia de fase A.	74
Tabla 4.4.2. Mediciones para determinar la resistencia de fase B.....	74
Tabla 4.4.3. Mediciones para determinar la resistencia de fase C.....	75
Tabla 4.4.4. Resistencias de fase A, B y C.....	75
Tabla 4.5.1. Mediciones para determinar la resistencia de fase A.	79
Tabla 4.5.2. Mediciones para determinar la resistencia de fase B.....	79
Tabla 4.5.3. Mediciones para determinar la resistencia de fase C.....	80
Tabla 4.5.4. Resistencias de fase A, B y C.....	80
Tabla 4.6.1. Resistencias de fase A, B y C.....	83
Tabla 4.6.2. Resistencias de fase A, B y C.....	85
Tabla 4.7.1. Datos experimentales de la prueba con carga.	91

Tabla 4.7.2. Datos experimentales de la medición de resistencia para la determinación de la temperatura al final de la prueba con carga.....	92
Tabla 4.8.1. Datos experimentales de la prueba en vacío.	95
Tabla 4.8.2. Datos experimentales de la medición de resistencia para la determinación de la temperatura al final de la prueba en vacío.....	96
Tabla 4.9.1. Datos experimentales de la prueba de rotor bloqueado según la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) a frecuencia nominal.	105
Tabla 4.9.2. Datos experimentales de la prueba de rotor bloqueado por la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) al 50 % de la frecuencia nominal.	106
Tabla 4.9.3. Datos experimentales de la prueba de rotor bloqueado por la IEC 60034-28(NTC 5642, 2008) al 25 % de la frecuencia nominal.	106
Tabla 4.9.4. Datos experimentales de la prueba de rotor bloqueado al 25 % de la frecuencia nominal, según la IEEE Std 112 – 2004.....	106
Tabla 4.10.1. Resultados iniciales para la determinación del circuito equivalente en función de la prueba de vacío.	107
Tabla 4.10.2. Resultados en función de las pérdidas constantes.	108
Tabla 4.10.3. Resultados en función de la prueba de vacío para determinar la reactancia total del estator.....	109
Tabla 4.10.4. Resultados de la inductancia de dispersión total de estator corregida.	109
Tabla 4.10.5. Resultados en función de la inductancia de dispersión sin corrección.	110
Tabla 4.10.6. Resultados de resistencia del rotor referida al estator, reactancia magnetizante y del estator.....	111
Tabla 4.10.7. Valores de los parámetros del circuito equivalente según la Norma IEC 60034-28 (NTC 5246,2008).....	111
Tabla 4.11.1. Resultados iniciales para la determinación del circuito equivalente	

según la Norma IEEE Std 112-2004, Método 1.....	113
Tabla 4.11.2. Resultados del proceso iterativos para la determinación del circuito equivalente según la Norma IEEE Std 112-2004, Método 1.....	113
Tabla 4.11.3. Resultados de las reactancias con previo cumplimiento de las condiciones de error.	113
Tabla 4.11.4. Resultados para el calculo de la fuerza electromotriz inducida a partir de la prueba de vacío.	114
Tabla 4.11.5. Resultados finales del método del circuito equivalente según la IEEE Std 112-2004, Método 1.	115
Tabla 4.11.6. Valores de los parámetros del circuito equivalente según la Norma IEEE Std 112-2004, Método 1.....	116
Tabla 4.12.1. Resultados del par inducido y otros valores en función del circuito equivalente según la Norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).	119
Tabla 4.12.2. Resultados del par inducido y otros valores en función del circuito equivalente según la Norma IEEE Std 112-2004.....	119
Tabla 4.13.1. Resultados de los distintos métodos de medición de resistencia del estator sin corrección por temperatura.....	120
Tabla 4.13.2. Aspectos y valoraciones otorgadas a cada método de medición de resistencia aplicada a la máquina de estudio.....	121
Tabla 4.13.3. Parámetros del circuito equivalente según las normas IEEE Std 112-2004, Método 1 y la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008)	126
Tabla 4.13.4. Observación y comparación de aspectos que definen el proceso de determinación del circuito equivalente según la Norma IEEE Std 112, 2004. Método 1 y la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).	127
Tabla 4.13.5. Resultados del par inducido el función de los parámetros del circuito equivalente según la Norma IEEE 112-2004, Método 1 y la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).	129

Tabla 4.14.1. Datos experimentales de la prueba de aumento de temperatura.	142
Tabla 4.14.2. Datos de la prueba de carga a tensión nominal al obtener la estabilidad térmica.	143
Tabla 4.14.3. Datos experimentales y determinación de la temperatura de operación del motor asincrónico rotor bobinado por medio de la medición de la resistencia.....	143
Tabla 4.14.4. Datos de la prueba de vacío aplicado sobre el motor asincrónico rotor bobinado.	145
Tabla 4.14.5. Datos de la prueba de rotor bloqueado del motor asincrónico rotor bobinado	145
Tabla 4.14.6. Datos básicos de placa de la máquina.....	146
Tabla 4.14.7. Parámetros del circuito equivalente a la temperatura de operación de 44,57° C.	146
Tabla 4.14.8. Datos necesarios de la determinación del circuito equivalente a la temperatura de operación de 44,57° C.....	146
Tabla 4.14.9. Datos de aumento de temperatura de la prueba de carga a tensión nominal de fase.	146
Tabla 4.14.10. Resultados para la determinación de la potencia de operación nominal de la máquina asincrónica rotor bobinado.	149

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.2.1. Esquema Eléctrico del Método Amperímetro – Voltímetro.....	20
Figura 3.2.2. Esquema Eléctrico del Método de Amperímetro.....	21
Figura 3.6.1. Modelo Tipo T del Circuito Equivalente de la Máquina Asíncrona. IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008)..	38
Figura 3.6.2. Característica típica de la inductancia Lts contra los valores de Im . IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).	43
Figura 3.6.3. Circuito Equivalente. IEEE Std 112-2004. Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators (p. 24).....	54
Figura 4.2.1. Conexión interna de la máquina jaula de ardilla para el estudio de comparación de normas.	66
Figura 4.2.2. Conexión interna de la máquina asíncrona rotor bobinado para el estudio de aumento de temperatura y potencia nominal.....	67
Figura 4.4.1. Diagrama de conexiones. Método Amperímetro – Voltímetro.	71
Figura 4.5.1. Diagrama de conexiones. Método del Amperímetro.	76
Figura 4.6.1. Diagrama de conexiones para el puente Kelvin.....	81
Figura 4.6.2. Diagrama de conexiones para el puente Wheatstone.	84
Figura 4.7.1. Diagrama de conexiones en la máquina de estudio (jaula de ardilla), prueba con carga.....	86
Figura 4.7.2. Diagrama de conexiones en el sistema de carga del motor jaula de ardilla, prueba con carga.....	87

Figura 4.8.1. Diagrama de conexiones para el motor jaula de ardilla (verde, banco 3), prueba sin carga.....	93
Figura 4.9.1. Diagrama de conexiones para el motor jaula de ardilla, prueba con rotor bloqueado a frecuencia nominal según la norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).	97
Figura 4.9.2. Diagrama de conexiones para la prueba con rotor bloqueado al 50 y 25 % de la frecuencia nominal según la norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).	98
Figura 4.9.3. Diagrama de conexiones para la prueba con rotor bloqueado al 25 % de la frecuencia nominal según la norma IEEE Std 112-2004.	99
Figura 4.10.1. Determinación de las pérdidas constantes en función de la tensión de fase en el estator.	108
Figura 4.10.2. Gráfica 1. Comportamiento de la inductancia en función de la corriente.	110
Figura 4.11.1. Determinación de pérdidas mecánicas en función de tensión inducida.	115
Figura 4.14.1. Diagrama de conexiones para determinar la resistencia de fase de la máquina asincrónica, rotor bobinado (Roja).	133
Figura 4.14.2. Diagrama de conexiones para la prueba de aumento de temperatura y prueba de carga a tensión nominal en el motor asincrónico, rotor bobinado (Roja).	134
Figura 4.14.3. Diagrama de conexiones para la prueba de vacío en el motor asincrónico, rotor bobinado (Roja).	135
Figura 4.14.4. Diagrama de conexiones para la prueba de rotor bloqueado al 25 % de la frecuencia nominal para el motor asincrónico, rotor bobinado, banco 3 (Roja).	136

SIGLAS

ANSI : *American National Standards Institute.*

AIEE : *American Institute of Electrical Engineers.*

CEN : Código Eléctrico Nacional.

IEC : *International Electrotechnical Commission.*

IEEE : *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

IRA : *Institute of Radio Engineers.*

NEMA: *National Electric Manufacturers Association.*

NTC : Norma Técnica Colombiana.

UCV : Universidad Central de Venezuela.

ACRÓNIMOS

AC	: <i>Alternating Current.</i>
COVENIN	: Comisión Venezolana de Normas Industriales.
DC	: <i>Direct Current.</i>
EIE	: Escuela de Ingeniería eléctrica.
LME	: Laboratorio de Máquina eléctricas.
MG	: <i>Motors and Generators.</i>

INTRODUCCIÓN

La máquina eléctrica rotativa en este caso las máquinas asincrónicas se pueden considerar como equipos eléctricos muy versátiles ya que estos pueden cambiar su estado, de consumo a generación eléctrica o viceversa (MOTOR – GENERADOR).

Debido a que esta máquina tiene un amplio número de parámetros eléctricos-mecánicos y que además, es un equipo esencial en el desarrollo de la industria, por un sin fin de aplicaciones, diversos organismos internacionales reconocidos ampliamente han elaborados varias normas que buscan estandarizar su manejo y caracterización. Estos organismos son conocidos como ANSI/IEEE (*American National Standards Institute / Institute of Electrical and Electronics Engineers*) y la IEC (*International Electrotechnical Commission*). Estas organizaciones reconocidas mundialmente estandarizan la máquina asincrónica con las Normas IEEE Std 112-2004 y Std 118-1978, y también se tiene las Normas IEC 60034 partes 1, 2-1 y 28, y la IEC 61972. Destacando que se usará la Norma Técnica Colombiana (NTC) indistintamente con la norma IEC dado por las dificultades que se presentaron para su adquisición.

Es importante tener en cuenta que según *Comparison of IEEE 112 and New IEC Standard 600034-2-1 (Wenping Cao, Member IEEE)*:

Es conocido que los estándares de pruebas del motor de inducción varían considerablemente en sus metodologías definidas, en exactitud de

instrumentación y procedimientos de pruebas. A veces, el valor de la eficiencia para el mismo motor puede discrepar en un 5 % entre distintos estándares. Aunque el mismo estándar sea usado en pruebas experimentales, la eficiencia de la máquina todavía puede variar por más del 2 %, cuando las pruebas son realizadas en sitios diferentes o por probadores distintos (p. 1).

Por eso se presenta este estudio comparativo de término más amplio entre estas dos importantes normas, para visualizar características de especial interés y ser aplicada en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela de Ingeniería de la UCV.

CAPÍTULO I

1.1 Planteamiento del problema

En el Laboratorio de Máquinas Eléctricas (LME) de la EIE-UCV se realizan los ensayos necesarios para caracterizar las máquinas asincrónicas, esto siguiendo las pautas de la norma ANSI/IEEE Std 112-2004 *Test Procedure for Induction Motor*. Sin embargo, existe la posibilidad de realizar otras pruebas o ensayos que tengan un gran valor académico. Las normas IEC que no se han consultado para la elaboración de los métodos de ensayo, y de ahí la importancia de analizar posibles diferencias, tanto en los procedimientos como en los parámetros que se puedan determinar. Es de especial importancia para el LME incluir, de ser posible llevar a cabo el ensayo de carga y corriente plena para verificar la potencia nominal de las máquinas del laboratorio.

1.2 Objetivo general

Establecer una comparación entre la metodología de ensayos propuestos por las normas internacionales IEC y la norma ANSI/IEEE para caracterizar las máquinas asincrónicas.

1.3 Objetivos específicos

- Estudiar los métodos de ensayos propuestos por las normas IEC y ANSI/IEEE.

- Determinar los ensayos propuestos por las normas que sean factibles de realizar en las instalaciones del laboratorio de máquinas eléctricas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UCV.
- Realizar un análisis comparativo entre los ensayos propuestos en la guía del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la EIE-UCV y su correlación con las pruebas propuestas en las normas IEC y ANSI/IEEE en lo referente a la caracterización de los parámetros eléctricos y mecánicos involucrados en el funcionamiento de una máquina asincrónica.
- Determinar la logística necesaria para ejecutar el ensayo de potencia nominal y corriente a carga plena para comprobar y comparar con lo existente en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la EIE-UCV.

1.4 Metodología

- Estudiar las normas ANSI/IEEE, IEC, la Guía del laboratorio de máquinas de la EIE-UCV y cualquier otro material que signifique aporte importante en términos de máquinas asincrónicas.
- Comprobar que el Laboratorio de Máquinas de la EIE-UCV cuente con el equipo requerido para realizar las pruebas de máquinas asincrónicas según las normas ANSI/IEEE e IEC.
- Ejecutar las pruebas de máquinas asincrónicas según normas ANSI/IEEE e IEC que cumplan con el equipamiento requerido para ensayos en el Laboratorio de Máquinas de la EIE-UCV.

- Realizar las pruebas pertinentes para confirmar que las máquinas pertenecientes al Laboratorio de Máquinas de la EIE-UCV manejen una potencia nominal en un valor aproximado al especificado en sus valores de placa.
- Comparar de forma metodológica, cuantitativa y cualitativa la ejecución de cada prueba.

CAPÍTULO II

2.1 *Marco teórico*

2.1.1 Organizaciones de Normativas:

2.1.1.1 La ANSI / IEEE

Historia:

Según la página iee.org :

La American National Standards Institute / Institute of Electrical and Electronics Engineers la cual representa una asociación internacional reconocida y dedicada a promover la innovación y excelencia tecnológica en beneficio de la humanidad, es la sociedad de profesionales técnicos más grande del mundo. Ésta diseñado para servir a los profesionales involucrados en todos los aspectos de los campos eléctricos, electrónicos y computación y áreas relacionadas de la ciencia y la tecnología que subyacen a la civilización moderna con la normalización de metodologías, valores relacionados al diseño, y/o todo lo referente a seguridad, en un amplio sentido de aplicación.

Las raíces de la IEEE, se remonta a la primavera de 1884, donde un pequeño grupo de individuos de profesiones electricistas se reunieron en Nueva York y formaron una nueva organización de apoyo a profesionales para aplicar la

innovación para el mejoramiento de la humanidad: la *American Institute of Electrical Engineers*, o AIEE por sus siglas.

Con la nueva industria llegó una nueva sociedad en 1912, el *Institute of Radio Engineers* (IRA). La IRA fue modelada en la AIEE, pero el 01 de enero de 1963, la AIEE y la IRA se fusionan para formar el la IEEE. En su formación, tenía 150.000 miembros, 140.000 de los cuales estaban en los Estados Unidos.

Objetivo:

Según La Referencia IEEE Std 112-2004:

Presentar un procedimiento para llevar a cabo un registro de las pruebas que son más comunes para determinar el rendimiento y las características de los motores de inducción polifásicos y generadores (p. 1).

Observaciones y descripción:

Al observar los distintos métodos presentados en dicha referencia se observa que el método “B” de la guía de laboratorio de máquinas eléctricas de la EIE-UCV no está enunciado, en cambio el método “A” de esta guía aun se presenta según la IEEE Std 112-2004 y es identificado como el método “1”. Existen otros tres métodos pero estos presentan un enfoque que no son de interés para este trabajo e incluso requieren prueba las cuales no son realizables en el LME de la EIE – UCV. Además hay que destacar que dicho método “B” aun es aplicado a pesar que este no se presenta en la IEEE Std 112-2004.

El método 1 se encuentra basado únicamente en el modelo tipo “T” del circuito equivalente. Este aplica fundamentos básicos de términos eléctricos para encontrar determinados parámetros pero también aplica procesos iterativos para mejorar los valores de reactancia del estator y magnetizante. Además usa la interpolación para encontrar indirectamente el valor de la resistencia equivalente a las pérdidas del núcleo o hierro.

Además hay que indicar que el LME de la EIE-UCV

2.1.1.2 La IEC

Historia:

Según la página iec.ch :

La *International Electrotechnical Commission*, fue creada el 26 junio 1906 en Londres, Reino Unido. Esta encargada de preparar y publicar Normas Internacionales para todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y afines, conocidas en su conjunto como “electrotecnología”. La IEC ofrece a la industria y los gobiernos una plataforma donde pueden reunirse, discutir y preparar las normas que necesitan. La IEC también administra tres Sistemas de Evaluación de la Conformidad para millones de dispositivos que utilizan o producen electricidad de cualquier forma. Más de 10 000 expertos en 174 Comités Técnicos con más de 1 000 Grupos de Trabajo, más de 6 000 Normas Internacionales en el Catálogo actual de la IEC, más de 500 000 Certificados de Evaluación de la Conformidad emitidos. Todas las Normas Internacionales IEC se crean por consenso y representan las necesidades de las partes

implicadas, clave de cada país que participa en el trabajo de la IEC, además de que facilitan el comercio mundial y garantizan la transferencia de tecnología.

La IEC es una de tres organizaciones que preparan Normas Internacionales a nivel mundial. Cuando corresponde, la IEC coopera con la Organización Internacional de Normalización (ISO) o la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) para garantizar que las Normas Internacionales se adecuen perfectamente y se complementen entre sí.

Objetivo:

Según la norma IEC 60034-28 (NTC 5642 2008):

Esta norma establece procedimientos para obtener valores de elementos de los modelos equivalentes monofásicos a partir de ensayos, define elementos normalizados en estos diagramas (p. 2).

Descripción:

Dicha Norma realiza las determinaciones necesarias en función del circuito equivalente tipo “T” pero en términos de la resistencia del núcleo o del hierro, su cálculo se fundamenta en un modelo distinto, el tipo “ π ”, donde la rama que representa las pérdidas en el hierro es ubicada directamente en los terminales de la máquina y en consecuencia las impedancia del estator y el rotor se encuentran en serie. Además de forma previa se requiere el valor de la resistencia de estator y para obtener principalmente las pérdidas que existen en el núcleo del motor y calcular la resistencia equivalente a la pérdida. Luego usando el modelo tipo “T” adaptado a los distintos ensayos, fundamentos básicos eléctricos y aplicando una herramienta

matemática usual como la interpolación, se determinan las diferentes inductancias y resistencias restantes que conforman el circuito equivalente en un modelo tipo “T”.

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS CONSIDERADAS

3.1 *Condiciones generales de los ensayos*

3.1.1 Según la Norma IEEE Std 112-2004. *Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*

Para el desarrollo de las pruebas es preciso tener en cuenta el error presente en los instrumentos, además de la forma en que se realiza la lectura del mismo, en valores máximos o en RMS. Esta norma destaca las siguientes condiciones de ensayo:

El desequilibrio de tensión no debe ser superior al 0,5 %. El porcentaje de desequilibrio de tensión es igual a 100 veces la desviación máxima de tensión de la tensión media, dividida por la tensión media. Ejemplo: Con tensiones de línea de 220 V, 215 y 210 V, la tensión media es de 215 V, la máxima desviación de la media es de 5, y es igual al desequilibrio $(100 \times 5) / 215 = 2,3 \%$ (p. 2).

Para ensayos en general, la desviación máxima de la frecuencia será de $\pm 0,5 \%$ del valor requerido, para la prueba que se lleva a cabo, a menos que se especifique lo contrario (p. 2).

La temperatura ambiente de referencia será de 25 °C. Si la temperatura ambiente durante una prueba de rendimiento es diferente de la temperatura ambiente de referencia, las determinaciones se corregirán a una temperatura ambiente de 25 °C (p. 4).

Todas las mediciones de voltaje y corriente son la raíz cuadrada media (root-mean-square, RMS) de los valores, a menos que se indique lo contrario (p.5).

Los instrumentos tendrán registro de calibración, dentro de los 12 meses de prueba, indicando los límites del error no mayor de $\pm 0,5$ % de la escala máxima para las pruebas generales (p. 6).

Los errores de los transformadores (instrumentos transformadores) utilizados no deberá ser superior a $\pm 0,5$ % (p. 6).

3.1.2 Según la Norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008). Rotating electrical machines. Test methods for determining quantities of equivalent circuit Diagrams for three-phase low-voltage cage Induction motors

Esta norma presenta antes de la ejecución de las pruebas una serie de condiciones vinculadas directamente a los errores en los instrumentos de medición los cuales son:

“La frecuencia debe estar dentro de $\pm 0,3$ % de la frecuencia de ensayo especificada durante las mediciones.” (p. 5).

“Los instrumentos de medición para magnitudes eléctricas, velocidad y frecuencia... deben tener una clase de exactitud de 0,5 ó inferior... Sin embargo, la clase de exactitud para la medición de resistencia debe ser 0,1. Ya que la exactitud de los instrumentos se expresa generalmente como un porcentaje de la escala total, el rango del instrumento escogido debe ser lo más bajo que resulte práctico.” (p. 5).

“Los transformadores de medida deben tener una clase de exactitud de 0,2” (p. 5).

“La instrumentación usada para medir las temperaturas debe tener una exactitud de ± 1 °C.” (p. 5).

“Se determina de la resistencia medida entre líneas... corregida a una temperatura de 25 °C del devanado de referencia.” (p. 10).

3.2 Medición y Determinación de la Resistencia Estática

Este método consiste en el sentido básico de la aplicación de la ley de ohm, lo que indica que una corriente es capaz de fluir por medio de un material considerado conductor y que este a su vez posee un valor de resistividad lo cual es directamente

proporcional al valor de resistencia del material, donde el efecto del paso de la corriente a través del conductor genera una caída de potencial en el mismo y cuyo valor es el producto de la corriente con la resistencia, pero esta corriente y el efecto del material de oponerse al paso de ésta genera una pérdidas que se manifiesta como en el aumento de temperatura del mismo y en consecuencia directa el aumento de la resistencia, este efecto natural es mejor conocido como el efecto Joule.

En la guía del LME de la EIE – UCV se indica que se usará cualquier método propuesto por la Norma IEEE Std 112-1984 que a su vez hace referencia a la Norma IEEE Std 118-1978. *Test Code for Resistance Measurement*, en dicha norma se enumeran varios métodos pero solo se utilizarán aquellos de interés. Donde se puede observar una tabla (p. 2) que indica los distintos métodos para un rango determinado de valores de resistencias y estos rangos están comprendidos hasta 5Ω , de 5 a 10Ω y de 10Ω a $M\Omega$. Con el fin de resaltar los puntos de interés se presenta de forma resumida en la tabla 3.2.1.

Tabla 3.2.1. Aplicación de métodos para la medición de resistencia

Resistencia a medir (rango).	Exactitud requerida.	Métodos de puente.	Métodos alternativos.
Baja resistencia (menores a aproximadamente a 5 Ω)	Mayor que 0,1 %	<ul style="list-style-type: none"> • Kelvin. • Comparador de corriente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Otro puente, método de proporción o comparador de corriente pueden ser usados.
	0,1 % - 1 %	<ul style="list-style-type: none"> • Kelvin. 	<ul style="list-style-type: none"> • Otro puente, método de proporción o comparador de corriente pueden ser usados.
	Menor que 1 %	<ul style="list-style-type: none"> • Cualquier circuito tipo puente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Amperímetro.
Valores intermedio de resistencia. (entre aproximadamente 5 y 10 Ω)	Mayor que 0,1 %	<ul style="list-style-type: none"> • Wheatstone. • Julie proporción tipo puente. • Comparador de corriente. 	
	0,1 % - 1 %	<ul style="list-style-type: none"> • Wheatstone. • Julie, proporción tipo puente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Amplificador operacional. • Óhmetro, tipo corriente constante.
	Menor que 1 %	<ul style="list-style-type: none"> • Cualquier circuito tipo puente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Voltímetro – Amperímetro. • Voltímetro. • Dispositivo de proporción tipo bobina cruzada. • Casi cualquier otro método.
Alta resistencia. (de 10 Ω a M Ω)	Mayor que 0,1 %	<ul style="list-style-type: none"> • Wheatstone modificado. • Julie proporción tipo puente. • Comparador de corriente. • Comparación directa, método de una resistencia patrón y un potenciómetro. 	
	0,1 % - 1 %	<ul style="list-style-type: none"> • Wheatstone modificado. • Julie, proporción tipo puente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Voltímetro – amperímetro.
	Menor que 1 %	<ul style="list-style-type: none"> • Wheatstone 	<ul style="list-style-type: none"> • Voltímetro – amperímetro modificado. Método directo de deflexión. • Perdida de carga.

Mientras en la Norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) referenciada a la IEC 60034-1 (NTC 2805, 2005) *Rotating Electrical Machines. Rating and Performance*, presenta una parte dedicada a la medición de la resistencia la cual señala varias pruebas en términos muy generalizado sin especificar una metodología exacta pero en la Norma IEEE Std 118-1978, se describen de forma precisas.

3.2.1 Objetivos

La determinación de la resistencia del devanado estático, es fundamental para determinar las pérdidas por elevación de temperatura (Efecto Joule), cálculo de

la temperatura del devanado al final de alguna prueba, desarrollo de los parámetros que constituyen al circuito equivalente de la máquina asincrónica y como medio de comprobación de posibles desperfectos o daños en la máquina.

3.2.2 Condiciones del ensayo

Para determinar la resistencia estática se tendrán presentes las siguientes condiciones:

- Para óhmetros del tipo puente (Thomson – Kelvin y Wheatstone) el error no será mayor al ± 1 % de la escala máxima del instrumento según la Norma IEEE Std 118-1978 (p. 2).

Con el fin de evitar posible daños durante la prueba se consultó la Norma COVENIN 3172:1995. Transformadores de potencia. Métodos de ensayo:

- Las mediciones de temperatura deberán ser lo más cercano a los conductores del devanado, inicialmente se puede asumir que el devanado está a temperatura ambiente en un lugar libre de corriente de aires en un mínimo de 24 horas, donde el ambiente no varíe bruscamente la temperatura y que presente un periodo de 27 horas de total inactividad eléctrica y mecánica antes de la prueba (p. 4).
- La corriente aplicada no deberá exceder el 15 % de la corriente nominal de la máquina, con el fin de evitar cambios en el valor de la resistencia por incremento de la temperatura en el conductor del devanado (p.4).

- Iniciar el ensayo con la resistencia limitadora (reostato) ajustada al máximo valor de resistencia para evitar posibles daños en algún equipo o elemento.
- Para las mediciones se pide un mínimo de diez lecturas en intervalos de tiempo ente 30 a 60 s máximo para máquinas menores de 50 kVA o 38 kW, para máquinas entre 50 a 200 kVA o entre 38 a 150 kW se aplicará en intervalos de 90 s y para máquinas mayores de 200 kVA o 150 kW se tomará en intervalos de 120 s.
- Para el método Amperímetro – Voltímetro se utiliza un interruptor de un polo en conexión serie al voltímetro para evitar daños por sobre picos de tensión ante carga inductiva.

3.2.3 Instrumentos y equipos

3.2.3.1 Para método Amperímetro – Voltímetro

- Conductores aislados flexible mínimo de 7 hilos, de calibre mínimo 14 AWG de cobre (Código Eléctrico Nacional (CEN) 2009, Tabla 310.5, Calibre mínimo de conductores) y para corrientes mayores de 25 A se recomienda usar del CEN 2009 la Tabla 310.17, (p. 146).
- Amperímetro DC del tipo hierro móvil, bobina móvil o electrodinámico con precisión no mayor al 0,5 %.
- Voltímetro DC del tipo hierro móvil, bobina móvil o electrodinámico con precisión no mayor al 0,5 %.

- Resistencia limitadora de 500 W mínimo.
- Interruptor de dos polos de corriente máxima inmediata superior al 15 % de la corriente nominal de la máquina.
- Interruptor de un polo de corriente máxima inmediata superior al 15 % de la corriente nominal de la máquina.
- Termómetro de alcohol o digital para aplicación sobre el ambiente.

NOTA: Se excluye el termómetro de mercurio dado a que este elemento al ser un metal se genera en el corrientes parasitas que dilata al metal por efecto Joule, debido a tensiones inducidas y producidas en el LME de la EIE-UCV, obteniendo así mediciones adulteradas.

3.2.3.2 Para método del Amperímetro

- Conductores aislados flexible mínimo de 7 hilos, de calibre mínimo 14 AWG de cobre (CEN 2009, Tabla 310.5, Calibre mínimo de conductores) y para corrientes mayores de 25 A se recomienda usar del CEN 2009 la Tabla 310.17, (p. 146).
- Amperímetro DC del hierro móvil, bobina móvil o electrodinámico con precisión no mayor al 0,5 %.
- Resistencia limitadora de 500 W mínimo.

- Interruptor de un polo de corriente máxima inmediata superior al 15 % de la corriente nominal de la máquina.
- Termómetro de alcohol para aplicación sobre el ambiente o digital, excluyendo de mercurio.

3.2.3.3 Para medición directa con Óhmetro tipo puente

Solo se requiere un instrumento de medición de resistencia de bajo valor donde según la Norma IEEE 118-1978 (p. 2) o la [tabla 3.2.1](#) del presente estudio, define a estos valores como los menores a 5 Ω , se recomienda óhmetros del tipo puente (Thomson – Kelvin o Wheatstone) para la medición. También se requiere de un termómetro para mediciones sobre el ambiente, de alcohol o digital, excluyendo de mercurio.

3.2.4 Procedimientos

3.2.4.1 Método Amperímetro – Voltímetro

Realizando el montaje descrito a través del esquema eléctrico de la figura 3.2.1:

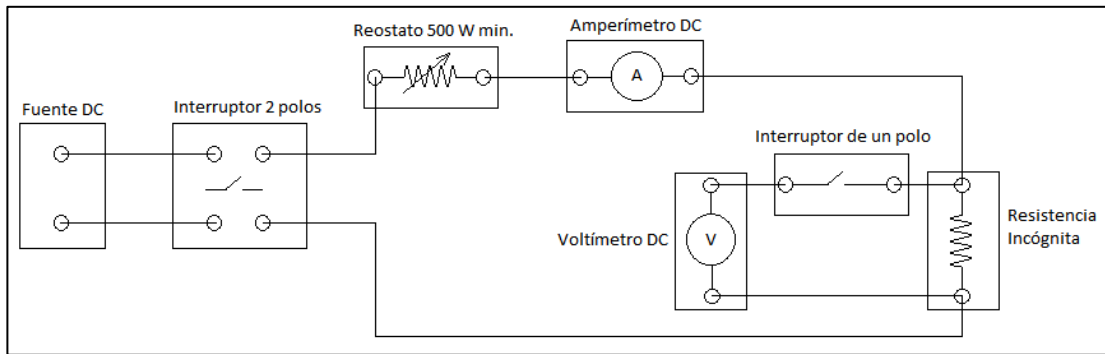


Figura 3.2.1. Esquema Eléctrico del Método Amperímetro – Voltímetro.

Se tiene que la resistencia incógnita puede ser calculada por medio de la ecuación (1):

$$R_X = \frac{V}{I - \frac{V}{R_V}}$$

Ec. 1

Donde:

R_X : Resistencia Incógnita [Ω].

V : Tensión medida [V].

I : Corriente medida [A].

R_V : Resistencia interna del voltímetro [Ω].

3.2.4.2 Método del Amperímetro

Realizando el montaje descrito a través del esquema eléctrico de la figura 3.2.2:

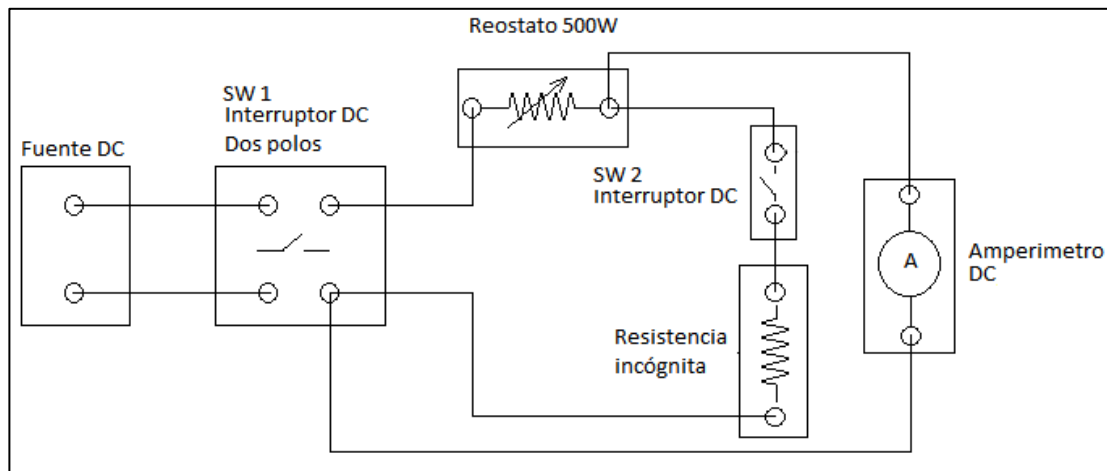


Figura 3.2.2. Esquema Eléctrico del Método de Amperímetro.

Se tiene que la resistencia incógnita puede ser calculada por medio de la ecuación (2):

$$R_x = \frac{I_2 \cdot R_a}{I_1 - I_2}$$

Ec. 2

Donde:

R_x : Resistencia Incógnita [Ω].

I_2 : Lectura en el Amperímetro con el interruptor cerrado SW2 [A].

R_a : Resistencia Interna del Amperímetro [Ω].

I_1 : Lectura en el Amperímetro con el interruptor abierto SW2 [A].

3.2.4.3 Medición Directa con Óhmetro tipo puente

Consiste en la aplicación directa sobre los terminales del elemento resistivo a determinar (aislado eléctricamente del resto del sistema), de un dispositivo autónomo

con fuente interna DC capaz de mostrar lecturas de resistencia dadas en Ohmios. Para efecto de estudio se recomienda un instrumento para mediciones de valores pequeños de resistencia, de rango preferiblemente de $0,01 \mu$ a 5Ω .

3.2.4.4 Cálculos para la determinación de la resistencia estática

Para los cálculos que intervienen en la determinación de la resistencia estática según las Normas IEEE Std 112-2004 y la IEC 60034-2-1 (NTC 3477, 2008) *Rotating Electrical Machines. Standard Methods for Determining losses and efficiency from tests*, se encontró que su metodología es casi la misma y puede ser presentado de otra forma debido a que es muy versátil, ya que permite no solo calcular la resistencia del elemento en función de la variación de la temperatura, sino también puede opera de modo contrario, encontrar la temperatura en función de la variación de la resistencia. Consiste en la manipulación de una ecuación para obtener la variable de interés, para efecto práctico se muestra como determinar la resistencia en función de la variación de la temperatura según la Norma IEC 60034-1 (NTC 2805, 2005), (pp. 37-38) a través de la ecuación (3):

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{T_2 + k}{T_1 + k}$$

Ec. 3

Donde:

T_1 : Temperatura del devanado en frío, en el momento de medir la resistencia inicial [°C].

T_2 : Temperatura del devanado en el punto de interés [°C].

R_1 : Resistencia inicial del devanado a la temperatura T_1 [Ω].

- R_2 : Resistencia del devanado en el punto de interés a la temperatura T_2 [Ω].
- k : Es el recíproco del coeficiente de temperatura de resistencia a 0 °C del material conductor.

Para el cobre $k = 235$.

Para el aluminio $k = 225$.

Donde la resistencia del devanado puede variar con respecto a la temperatura la cual se debe estabilizar cuando alcance condición de operación nominal en la máquina, ya que su resistencia cambia por efecto Joule.

El estator de una máquina asíncrona trifásica puede estar en una configuración delta (Δ) o estrella (Y), entonces la resistencia se encuentra en combinación paralelo-serie o viceversa, respectivamente. Ante tal situación se requiere una metodología de trabajo la cual no indica la Norma IEEE Std 112 ni 118, pero si es expuesta por la IEC 60034-2-1 (NTC 3477, 2008) como:

“Resistencia entre líneas. Para máquinas polifásicas de corriente alterna, es 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 Δ , la resistencia de la fase es 1,5 veces la resistencia entre líneas.” (p. 7).

Para interés del circuito equivalente la resistencia medida se modela como la resistencia de la fase.

3.3 *Prueba con carga variable.*

Esta prueba se presenta según los señalamientos de la Norma IEC 61972 (NTC 5293, 2004) pero no significa que está no pueda ser adaptada a otra finalidad u orientada en un interés en particular, como es el caso de los ensayos pertinentes al aumento de temperatura para comprobar potencia nominal, la cual requiere una prueba de carga donde solo se registran o se miden valores pertinentes al 100 % de la carga pero esto no implica que las condiciones sobre la red de alimentación o sobre la prueba dejen de cumplirse, seguramente adaptadas pero no descartas.

3.3.1 Objetivo

Obtener mediciones de por lo menos la corriente, voltaje, y potencia en la máquina asincrónica bajo la condición de variación de carga (puede incluirse la medición de velocidad en el eje).

3.3.2 Condiciones del ensayo

- La carga máxima no excederá el 150 % de la carga nominal.
- La máquina deberá estar en modo motor para la prueba.
- Antes de comenzar el ensayo los transformadores de corriente debe estar en corto para evitar daños en los equipos si se arranca a tensión nominal.
- Cuando se aplica la carga al motor, se empieza en la carga más alta y se continúa descendiendo hasta llegar al valor más bajo para realizar las mediciones.

- Las mediciones se deben realizar lo más rápido que sea posible para minimizar los cambios de temperatura en la máquina durante el ensayo.

En caso que la prueba de carga sea requerida para determinar la potencia nominal de la máquina en función de aumento de temperatura se presenta la siguiente condición:

- Aplicar la prueba de carga variable solo registrando las mediciones requerida por la misma al 100 % de la carga posterior a la identificación o presencia de estabilidad térmica en la máquina.

3.3.3 Instrumentos y equipos

- Conductores aislados flexible mínimo de 7 hilos, de calibre mínimo 14 AWG de cobre (CEN 2009, Tabla 310.5, Calibre mínimo de conductores) en caso de corrientes mayores de 25 A se recomienda usar del CEN 2009 la Tabla 310.17 (p. 146) (Ver [anexo B](#), [tabla B1](#) para calibres mínimos de conductores por cada máquinas del LME de la EIE – UCV).
- Interruptor trifásico AC, a pesar que el CEN 2009 en su artículo 430.110(A) (p. 350). Disposiciones generales. Señala que la corriente del interruptor no será menor al 115 % del valor nominal, la prueba exige corrientes hasta el 150 % del valor nominal de la máquina por lo tanto para garantizar un óptimo trabajo del interruptor, este no será menor al 200 % de la corriente nominal de la máquina y el artículo anterior no aplica.

- Cantidad de vatímetros según lo requiera el método aplicado para medición de potencia activa.
- Transformadores de corriente.
- Amperímetros AC del tipo hierro móvil, bobina móvil con rectificador o instrumento electrodinámico, con precisión no mayor al 0,5 %.
- Voltímetros AC del tipo hierro móvil, bobina móvil con rectificador o instrumento electrodinámico, con precisión no mayor al 0,5 %.
- Variac de corriente mínima, superior al 200 % de la corriente nominal de la máquina asincrónica.
- Cuenta revoluciones o tacómetro.

3.3.4 Procedimiento

Según el ensayo presentado en las Normas IEEE Std 112-2004, la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) y la IEC 61972 (NTC 5293, 2004) *Method for Determining Losses and Efficiency of three phase cage Induction Motors*, se encontró que estas normas poseen una misma metodología pero esta última mencionada indica además que se requiere determinar directa o indirectamente la temperatura de la máquina y donde dicha norma se toma como referencia para el estudio.

Se aplica la carga al motor en seis puntos de carga (seis valores de carga distinta). Se deben elegir cuatro puntos de carga que se distribuyen en intervalos aproximadamente iguales entre 25 % y hasta 100 % de la carga,

inclusive. Los dos puntos de carga restantes se deben elegir de modo que se distribuyan a intervalos aproximadamente iguales entre 100 % y 150 % de la carga, como máximo. Cuando se aplica la carga al motor, se empieza en la carga más alta y se continúa descendiendo hasta llegar al valor más bajo. Estos ensayos se deben realizar lo más rápido que sea posible para minimizar los cambios de temperatura en la máquina durante el ensayo (p. 6).

En cada uno de los seis puntos, se miden tensión en los terminales, corriente de línea, potencia de entrada, par, frecuencia y velocidad del eje... Durante las mediciones para cada punto, la variación de la frecuencia debe ser inferior a 0,1 % (p. 6).

“**NOTA:** Las unidades son SI, según el listado de la norma IEC 60027-1. La velocidad n es la frecuencia rotacional en [s^{-1}] ($s^{-1} = \text{rev} / \text{s}$). Los valores de la velocidad en [min^{-1}] ($\text{min}^{-1} = \text{rev} / \text{min}$) se deben dividir por 60.” Según la Norma IEC 61972 (NTC 5293, 2004), (p. 4).

Además se debe medir la temperatura al final de la prueba θ_L del punto más caliente, esta medición puede ser por medición directa debido a sensores internos o por medio de medición de resistencia para determinar la temperatura en el punto más caliente de la máquina (en la bobina estática en el área del entrehierro).

Esta prueba es perfectamente realizable en el LME de la EIE – UCV a excepción por la medición directa de par en la máquina ya que no cuenta con instrumentos para esta finalidad.

3.4 Prueba sin Carga o de Vacío

3.4.1 Objetivo

Obtener mediciones de por lo menos la corriente, voltaje, y potencia en la máquina asincrónica bajo la condición de eje libre mecánicamente.

3.4.2 Condición del ensayo

- La corriente máxima no excederá el 100 % de sus valores nominales.
- La máquina deberá estar en modo motor en vacío, es decir, el eje de la máquina debe estar libre mecánicamente.
- Antes de comenzar el ensayo los transformadores de corriente debe estar en condición de corto para evitar daños en los equipos si se arranca a tensión nominal.
- Cuando se aplica la tensión al motor, se empieza en el 125 % del valor nominal y se continúa descendiendo hasta llegar al valor más bajo para realizar las mediciones.

3.4.3 Instrumentos y equipos

- Conductores aislados flexible mínimo de 7 hilos, de calibre mínimo 14 AWG de cobre (CEN 2009, Tabla 310.5, Calibre mínimo de conductores) en caso de corrientes mayores de 25 A se recomienda usar del CEN 2009

la Tabla 310.17 pagina 146 (Ver [anexo B](#), [tabla B1](#) para calibres mínimos de conductores por cada máquinas del LME de la EIE – UCV).

- Interruptor trifásico AC, el CEN 2009 en su Artículo 430.110(A) (p. 350). Disposiciones generales. Señala que la corriente del interruptor no será menor al 115 % del valor nominal de la máquina, considerando como mínimo una operación nominal en la máquina.
- Cantidad de vatímetros según lo requiera el método aplicado para medición de potencia activa.
- Transformadores de corriente.
- Amperímetros AC del tipo hierro móvil, bobina móvil con rectificador o instrumento electrodinámico, con precisión no mayor al 0,5 %.
- Voltímetros AC del tipo hierro móvil, bobina móvil con rectificador o instrumento electrodinámico, con precisión no mayor al 0,5 %.
- Variac de corriente mínima, superior al 200 % de la corriente nominal de la máquina asincrónica.

3.4.4 Procedimiento

Para este ensayo se encontró que básicamente es la misma metodología y que solo difiere en tres detalles; uno que según la norma IEC (60034-28 ó 61972) esta prueba se realizará inmediatamente después de la prueba de carga, detalle no discutido en la IEEE Std 112-2004; dos, el cómo se tomarán los puntos de medición para la prueba, no anunciada en las Norma IEEE Std 112-2004 pero definido en la

IEC 61972 (NTC 5293, 2004); y tres, la medición de temperatura en la máquina al final del ensayo, indicada en la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) pero no indicada directamente en la prueba de vacío sino en el desarrollo del circuito equivalente, Artículo 7.3.1 (p. 10). Donde se toma la Norma IEC 61972 (NTC 5293, 2004) como referencia para dar a conocer su metodología:

... se desacopla el motor del dispositivo de aplicación de carga y se aplica potencia con la frecuencia nominal para el motor en cuatro valores de tensión, incluyendo el 100 %, a intervalos aproximadamente iguales entre 125 % y 60 % de la tensión nominal y tres o más valores de tensión, a intervalos aproximadamente iguales entre 50 % y 20 % aproximadamente de la tensión nominal o hasta un punto en donde la corriente de línea alcance un valor mínimo o se vuelva inestable. El ensayo se debe realizar lo más rápidamente que sea posible, tomando las lecturas en orden descendente de tensión. En cada uno de los valores de tensión se miden tensión en los terminales, corriente de línea y potencia de entrada (p.7).

Además se deberá registrar la temperatura al final del ensayo bien por medición directa o indirecta.

3.5 *Prueba con Rotor Bloqueado*

3.5.1 Objetivo

Consiste en realizar mediciones en una máquina eléctrica rotativa con el rotor bloqueado, en por lo menos tensión, corriente y potencia, a una tensión reducida y donde la corriente se maneja a un valor aproximado a la nominal.

3.5.2 Condición del ensayo

- Corriente del ensayo:
 - No excederá el 100 % de su valor nominal según la Norma IEEE Std 112-2004.
 - Deberá estar en un rango del 10 al 150 % de sus valor nominal según la Norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).
- La máquina deberá estar en modo motor bajo la condición de rotor bloqueado mecánicamente.

3.5.3 Instrumentos y equipos

- Conductores aislados flexible mínimo de 7 hilos, de calibre mínimo 14 AWG de cobre (CEN 2009, Tabla 310.5, Calibre mínimo de conductores) en caso de corrientes mayores de 25 A se recomienda usar del CEN 2009 la Tabla 310.17 (p. 146) (Ver [anexo B](#), [tabla B1](#) para calibres mínimos de conductores por cada máquina del LME de la EIE – UCV).

- Interruptor trifásico AC, según el CEN 2009 en su artículo 430.110(A) (p. 350). Disposiciones generales. Señala que la corriente del interruptor no será menor al 115 % del valor nominal, especificación aplicable la prueba de rotor bloqueado según la Norma IEEE Std 112 – 2004 que exige corrientes hasta el 100 % del valor nominal de la máquina, pero la Norma IEC 60034-28 (NTC 5642,2008) para la misma prueba indica que la corriente será hasta el 150 % del valor nominal de la máquina, por lo tanto para garantizar un óptimo desempeño del interruptor, este no será menor al 200 % de la corriente nominal de la máquina y el artículo anterior del CEN 2009 no aplica.
- Cantidad de vatímetros según lo requiera el método aplicado para medición de potencia activa.
- Transformadores de corriente.
- Amperímetros AC del tipo hierro móvil, bobina móvil con rectificador o instrumento electrodinámico, con precisión no mayor al 0,5 %.
- Voltímetros AC del tipo hierro móvil, bobina móvil con rectificador o instrumento electrodinámico, con precisión no mayor al 0,5 %.
- Variac de corriente mínima, superior al 200 % de la corriente nominal de la máquina asincrónica.

3.5.4 Procedimiento

Se encontró que existen diferencias en la metodología para la prueba de rotor bloqueado, entre ellas el diseño de la máquina y que el ensayo se trata a distintos valores de la frecuencia nominal, según las Normas IEEE Std 112-2004 e IEC

60034-2-1 (NTC 3477, 2008). Estas características no se toman en cuenta en la definición del ensayo pero al referirse al método de determinación del circuito equivalente (Artículo 7.5.3) (p. 14) destaca que esta no solo se realiza a frecuencia nominal sino también a 50 y al 25 % de ella.

Dado que la prueba de rotor bloqueado es exactamente la misma según las Normas IEC 60034-2-1 (NTC 3477, 2008) y IEEE Std 112-2004, las cuales son distintas a la Norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) entonces se toma como referencia metodológica las dos últimas normas mencionadas:

3.5.4.1 Según la Norma IEEE Std 112-2004

Este ensayo es aplicable a cualquier valor de frecuencia pero siempre a corriente nominal. Aunque el Método 1 para la determinación del circuito equivalente exige que el ensayo debe realizarse a un máximo del 25 % de la frecuencia nominal.

NOTA: El rotor de un motor de jaula de ardilla es una barra simétrica bobinado, por lo tanto, la impedancia del motor es prácticamente el mismo para cualquier posición relativa del rotor en el estator.

La impedancia de un motor de rotor bobinado varía con la posición relativa del rotor en el estator. Por ello es necesario realizar una prueba de rotor bloqueado para determinar la posición del rotor que se traduce en un valor promedio de la impedancia. Antes de tomar las lecturas de la máquina de rotor bobinado, el rotor se cortocircuita. La distancia angular a través del cual es necesario para observar la variación en curso se determinará calculando al

girar el rotor lentamente y observar la corriente del estator,... Para las máquinas con un número entero de ranuras por polo y por fase, tanto en el rotor y el estator, esta distancia será igual a dos tercios de un campo de polo para las máquinas de tres fases. Para las máquinas de ranura que tienen bobinados fraccionarios, la distancia angular puede ser tanto como un paso polar completo.

El rotor bobinado de un motor se bloquea para que no pueda girar libremente, pero se puede mover, y el voltaje aplicado se incrementará gradualmente hasta que se obtenga aproximadamente una corriente de valor nominal.

La tensión y corriente se leerán y serán registradas en todas las fases, la tensión en las diferentes fases deberán estar equilibradas. Sosteniendo la misma tensión, al rotor se le dará vuelta lentamente y registrando los valores mínimos y máximos de la corriente durante un ciclo completo. Entonces el rotor se bloqueará para la prueba, en la posición que de una corriente igual a la media de los valores registrados anteriormente.

... se debe tomar lecturas simultáneas de tensión y corriente en todas las fases y de entrada de energía en varios niveles de tensión a fin de establecer el valor con un cuidado especial en aproximadamente la corriente a plena carga.

3.5.4.2 Según la Norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008)

La prueba de rotor bloqueado se recomienda para máquinas con tamaño constructivo mayores de 132 y no menos de 1 kW de potencia de salida nominal (p. 8).

Bloquee el rotor y aplique tensión reducida a frecuencia nominal a los terminales. El deslizamiento llegará a 1,0. Incremente la tensión hasta que la corriente I de línea sea igual a 1,5 veces la corriente nominal. (p. 8).

NOTA: Lo anterior señalado es perfectamente aplicable a cualquier valor de frecuencia, como lo indica en el Artículo 7.5.3 de la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) (p. 14):

Al menos tres frecuencias (frecuencia nominal, la mitad de la frecuencia y un cuarto de frecuencia).

Mida y registre tensión en los terminales, corriente de línea y potencia de entrada al menos para 10 valores de corriente a intervalos aproximadamente iguales, entre el 150 % y el 10 % de la corriente nominal, incluida una lectura a corriente nominal. (p. 8).

Se recomienda que los valores de corriente usados para este ensayo se ajusten a los valores usados en el ensayo sin carga en el mejor de los casos. El ensayo

se debe llevar a cabo lo más rápidamente posible con las lecturas tomadas en orden descendente de tensión y corriente. (p. 8).

3.6 *Métodos para la Determinación del Circuito Equivalente*

3.6.1 Objetivo

Determinar los parámetros que constituyen el modelo equivalente de la máquina asincrónica por medio de métodos matemáticos.

Este modelado matemático de variables o parámetros físicos de términos eléctricos los cuales interactúan para simular el comportamiento eléctrico de una máquina rotativa asincrónica determinando corrientes, tensiones, resistencias, reactancia, pérdidas eléctricas y mecánicas. Partiendo de datos recaudados de distintas pruebas como la medición de resistencia, prueba de carga, de vacío y la prueba con el rotor bloqueado.

3.6.2 Procedimiento

En los métodos observados se distingue una clara diferencia por parte de ambas normas las cuales se presenta a continuación:

3.6.2.1 Según la Norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) (pp. 1 – 17)

Esta norma al igual que la Norma IEEE Std 112-2004, se encuentra orientada hacia varios fines que no son de interés para el estudio y por lo tanto se presenta únicamente las partes de interés.

Pruebas y datos requeridos:

- Prueba para la determinación de resistencia según temperatura o viceversa.
- Prueba de carga en específico valores nominales y temperatura al final del ensayo.
- Prueba de vacío y temperatura al final del ensayo.
- Prueba de rotor bloqueado, esencialmente a frecuencia nominal, la prueba al 50 y 25 % dependerá del como se oriente la determinación del circuito equivalente, en específico la corrección de la inductancia de dispersión L_{σ} , por cálculo o por medición.

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.

Según esta norma se determina el circuito equivalente por medio del modelo tipo T, identificado en la figura 3.6.1.

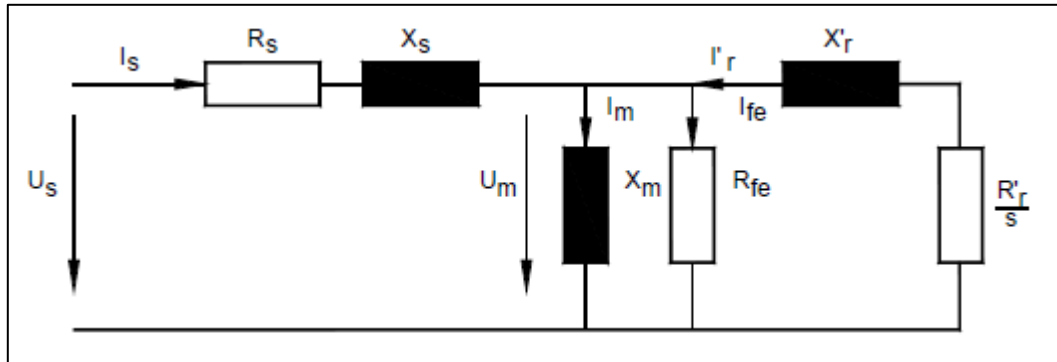


Figura 3.6.1. Modelo Tipo T del Circuito Equivalente de la Máquina Asíncrona. IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008). *Rotating Electrical Machines. Test methods for determining quantities of equivalent circuit diagrams or three-phase low-voltage cage Induction Motors* (p. 9).

Resistencia Estatórica:

Se mide y determina la resistencia estática según la metodología reseñada en el [numeral 3.2](#) Medición y Determinación de la Resistencia Estatórica, y corregida a una temperatura de 25 °C.

Pérdidas Constantes:

Se obtiene las pérdidas constante trifásica P_k , que son las sumas de las pérdidas por fricción, ventilación y las pérdidas en el núcleo, para cada valor de corriente registrada en el ensayo sin carga, usando la ecuación (4). Con una resistencia estática R_s , corregida a la temperatura de la prueba sin carga.

$$P_k = P_0 - 3 \cdot I_s^2 \cdot R_s \cdot \frac{k + \emptyset_{NL}}{k + 25}$$

Ec. 4

Donde según la configuración del bobinado del estator:

En devanados conectados en estrella (Y) o conexiones equivalentes se usara la ecuación (5).

$$I_s = I$$

Ec. 5

En devanados conectados en delta (Δ) se usará la ecuación (6).

$$I_s = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

Ec. 6

Pérdidas por ventilación y fricción:

“Para cada uno de los valores de tensión registrados con el 50 % o menos de la tensión nominal durante el ensayo sin carga, grafique las pérdidas constantes P_K según se determina en” la ecuación (4), “contra el cuadrado de la tensión U^2 . Extrapolando una línea recta a tensión cero, la intersección con el eje de la tensión cero corresponde a las pérdidas por fricción y ventilación P_{fw} . Las pérdidas por ventilación y fricción se consideran independientes de la carga”.

Observando que se usa la tensión en los terminales U , debido a que el modelo tipo “T” implementado presenta una modificación respecto a la rama que representa las perdidas en el núcleo, esta modificación consiste en mover dicha rama de tal manera que se encuentre en paralelo con la conexión serie de las impedancias del estator y del rotor, dejando la rama de interés sometida a la tensión aplicada en los terminales, este es el llamado modelo tipo “ π ”.

Pérdidas en el Hierro:

Determine las pérdidas en el hierro a partir de la ecuación (7):

$$P_{fe} = P_K - P_{fw}$$

Ec. 7

Determine la resistencia equivalente de las pérdidas en el hierro con la ecuación (8):

$$R_{fe} = \frac{3 \cdot U_s^2}{P_{fe}}$$

Ec. 8

Donde:

Para devanados conectados en estrella (Y), la ecuación (9).

$$U_s = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$$

Ec.9

Para devanados conectados en delta (Δ), la ecuación (10).

$$U_s = U_N$$

Ec. 10

“La resistencia R_{fe} no se debe corregir por temperatura cuando se aplica el circuito equivalente. Sin embargo, se debe corregir en cuanto a frecuencia

cuando se calcula el circuito equivalente para una frecuencia f diferente de la frecuencia nominal f_N mediante la siguiente”, ecuación (11):

$$R'_{fe} = R_{fe} \cdot \sqrt{\frac{f}{f_N}}$$

Ec. 11

Inductancia total del estator ($L_{ts} = L_m + L_s$):

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

De los datos de la **prueba en vacío** determine la impedancia del motor y el factor de potencia para cada uno de las medidas obtenidas.

Para devanados conectados en estrella (Y), la ecuación (12):

$$Z_{s=0} = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$$

Ec. 12

Para devanados conectados en delta (Δ), la ecuación (13):

$$Z_{s=0} = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$$

Ec. 13

Determine el factor de potencia, por la ecuación (14):

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}}$$

Ec. 14

Determine la resistencia, por la ecuación (15):

$$R_{s=0} = Z_{s=0} \cdot \cos \varphi_0$$

Ec. 15

Determine la corriente magnetizante:

Para devanados conectados en estrella (Y), la ecuación (16):

$$I_m = I$$

Ec. 16

Para devanados conectados en delta (Δ), la ecuación (17):

$$I_m = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

Ec. 17

Determine la reactancia total del estator, usando la ecuación (18):

$$X_{ts} = \sqrt{Z_{s=0}^2 + R_{s=0}^2}$$

Ec. 18

Determine la inductancia total del estator, por la ecuación (19):

$$L_{ts} = \frac{X_{ts}}{2 \cdot \pi \cdot f_N}$$

Ec. 19

Obtenga la Gráfica 1, los valores de L_{ts} contra los valores de I (véase una característica típica de la Figura 3.6.2). Esta gráfica solo tiene el fin de observar el comportamiento.

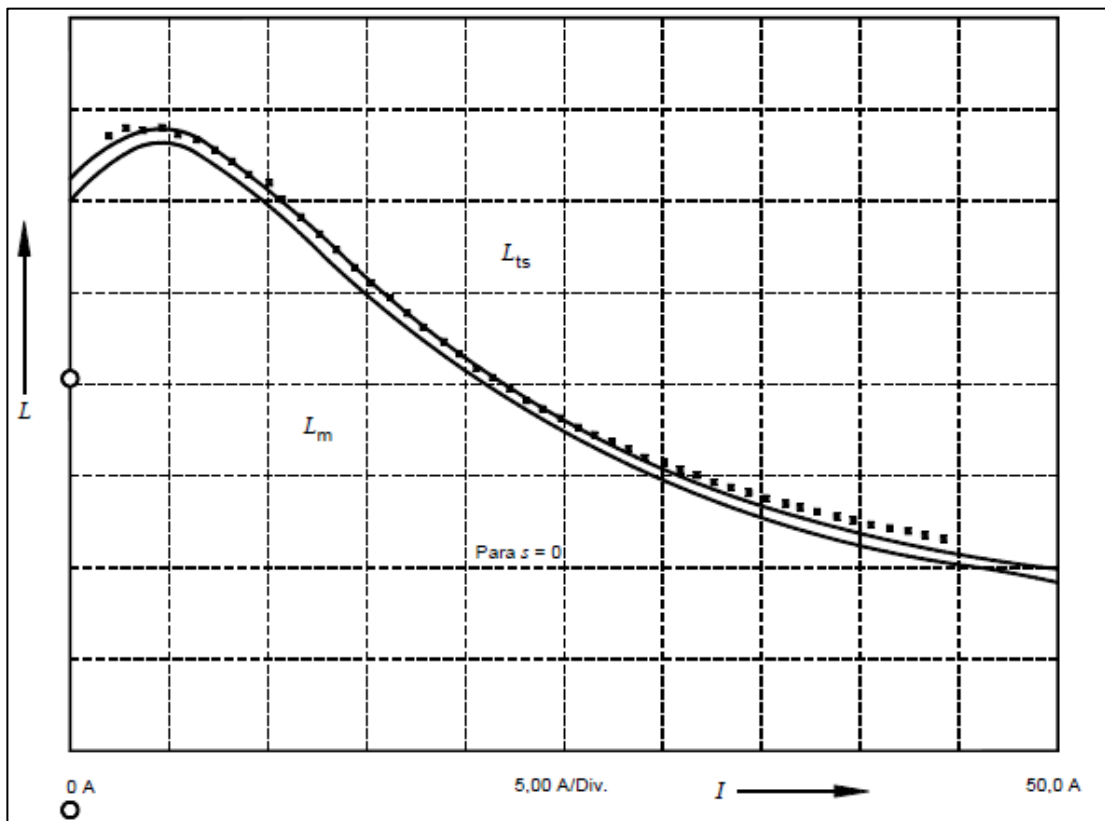


Figura 3.6.2. Característica típica de la inductancia L_{ts} contra los valores de I_m . IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008). *Rotating Electrical Machines. Test methods for determining quantities of equivalent circuit diagrams or three-phase low-voltage cage Induction Motors* (p. 12).

Si hay disponibles detalles de diseño, utilice la relación calculada $k_{\sigma} = L_s/L'_r$. De lo contrario:

- Para motores de diseño especial como los de doble jaula o rotores de barra profunda, la relación $k_{\sigma} = L_s/L'_r = 0,67$.
- Para motores de una sola jaula, la relación $k_{\sigma} = L_s/L'_r = 1$, se debe usar por definición.

Para cada corriente de línea medida en el ensayo de **rotor bloqueado a frecuencia nominal**, determine la impedancia y el factor de potencia del motor:

Para devanados conectados en estrella (Y), la ecuación (20):

$$Z = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$$

Ec. 20

Para devanados conectados en delta (Δ), la ecuación (21):

$$Z = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$$

Ec. 21

Determine el factor de potencia, por medio de la ecuación (22):

$$\cos \varphi_{rb} = \frac{P_{rb}}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}}$$

Ec. 22

Determine la resistencia, por la ecuación (23):

$$R = Z \cdot \cos \varphi_{rb}$$

Ec. 23

Determine la reactancia de dispersión total del estator sin tener en cuenta el efecto pelicular $X_{\sigma a}$, por la ecuación (24):

$$X_{\sigma a} = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

Ec. 24

Determine la inductancia de dispersión total del estator sin tener en cuenta el efecto pelicular, por la ecuación (25):

$$L_{\sigma a} = \frac{X_{\sigma a}}{2 \cdot \pi \cdot f_N}$$

Ec. 25

NOTA: Para esta inductancia es necesario realizar una corrección **por cálculo** o **por medición**, donde la corrección por medición requiere que la prueba de rotor bloquea se realice no solo a frecuencia nominal sino también al 50 y 25 % de ésta.

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.

Determine la altura estimada de la barra del conductor del rotor h , por la ecuación (26):

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

Ec. 26

NOTA: El tamaño constructivo del motor H , es la altura del eje en milímetros. La altura real de la barra-conductor se debería usar si se conociera el diseño interno del motor. Especialmente en el caso de rotores con doble jaula, el factor k_1 de efecto pelicular (skin) real se debería usar si el fabricante lo tiene a disposición.

NOTA: La altura H del eje también puede ser determinada conocido el tamaño constructivo de la carcasa (frame) y utilizando la Norma *NEMA (National Electric Manufacturers Association) Standards Publication MG 1-2006 Revision 1. Motors and Generators*, en su Artículo 4.2.1 (p.10), la cual indica que la altura de la barra del rotor D [inches] es una relación de tomar los dos primeros dígitos de la numeración dada al tamaño constructivo, tomarlo como un valor y dividirlo por cuatro, dado a que este cociente se expresa en pulgadas es necesario obtener su equivalencia en milímetros [mm].

Determine ξ para el **ensayo de rotor bloqueado**, por la ecuación (27):

$$\xi = h \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \gamma_r}$$

Ec. 27

NOTA: Para rotores con barras de cobre, use $\gamma_r = 56 \cdot 10^6 \text{ S/m}$, para rotores con barras de aluminio use $\gamma_r = 33 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ a menos que se especifique algo diferente.

Determine el **factor del efecto pelicular** (skin), por la ecuación (28):

$$k_1 = \frac{3}{2 \cdot \bar{\xi}} \cdot \frac{\sinh(2 \cdot \xi) - \sin(2 \cdot \xi)}{\cosh(2 \cdot \xi) - \cos(2 \cdot \xi)}$$

Ec. 28

Determine la inductancia de dispersión total corregida, usando la ecuación (29):

$$L_\sigma = L_{\sigma a} \cdot \frac{k_\sigma + 1}{k_\sigma + k_1}$$

Ec. 29

Obtenga la curva sobre la Grafica 1, de los valores de L_σ contra los valores de I , los valores de I tomados en el ensayo de rotor bloqueado, en caso de ser necesario interpole para encontrar el valor de L_σ en función de la corriente nominal.

Por medición:

El ensayo de rotor bloqueado se debe 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 L_σ se deben graficar contra la frecuencia y se debe obtener una curva para extrapolar la inductancia a $f_{rotor} = 0$.

Ya que el desplazamiento de corriente es una función compleja dependiente de la frecuencia, no se puede dar una fórmula de extrapolación. La exactitud de los resultados no siempre es mejor que las fórmulas para estimación usadas en la corrección del desplazamiento de corriente por medición.

Inductancia Magnetizante L_m y tensión U_m :

Ahora con los valores de la inductancia total del estator L_{ts} y la inductancia de dispersión total corregida a corriente nominal se determina el valor de la inductancia magnetizante L_m , usando la ecuación (30).

$$L_m = L_{ts} - \frac{L_\sigma}{1 + \frac{1}{k_\sigma}}$$

Ec. 30

Determine la tensión magnetizante según la ecuación (31).

$$U_m = 2 \cdot \pi \cdot f_N \cdot L_m \cdot I_m$$

Ec. 31

Este calculo no posee un fin interesante para el objetivo de la determinación del circuito equivalente pero puede ser de especial interés para la comparación entre las normas de interes.

Inductancias de dispersión del estator y del rotor, L_s y L'_r :

Con los valores de inductancia total del estator L_{ts} , inductancia de dispersión total L_σ e inductancia magnetizante L_m , calcule inductancia de dispersión del estator L_s y la del rotor reflejada al estator L'_r , usando las ecuaciones (32) y (33) respectivamente.

$$L_s = L_{ts} - L_m \quad \text{Ec. 32}$$

$$L'_r = L_\sigma - L_s \quad \text{Ec. 33}$$

A partir de la **prueba de carga**, determine:

El deslizamiento del motor según la ecuación (34).

$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} \quad \text{Ec. 34}$$

La impedancia del motor:

Para devanados conectados en estrella (Y), la ecuación (35):

$$Z = \frac{U_1}{I_1 \cdot \sqrt{3}} \quad \text{Ec. 35}$$

Para devanados conectados en delta (Δ), la ecuación (36):

$$Z = \frac{U_1 \cdot \sqrt{3}}{I_1}$$

Ec. 36

Determine el factor de potencia usando la ecuación (37):

$$\cos \varphi_{rb} = \frac{P_{rb}}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}}$$

Ec. 37

Calcule la reactancia del motor según la ecuación (38).

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

Ec. 38

Determine las reactancias de las inductancias de magnetización, de dispersión del estator y del rotor (L_m , L_s y L'_r), por medio de las ecuaciones (39), (40) y (41).

$$X_m = 2 \cdot \pi \cdot f_N \cdot L_m$$

Ec. 39

$$X_s = 2 \cdot \pi \cdot f_N \cdot L_s$$

Ec. 40

$$X'_r = 2 \cdot \pi \cdot f_N \cdot L'_r$$

Ec. 41

Con los valores de reactancias (X_m , X_s y X'_r), deslizamiento (s) y temperatura al final del ensayo con carga (θ_L), determine la resistencia del rotor referida al devanado del estator y corregida a una temperatura de referencia de 25 °C, según la ecuación (42).

$$R'_{r,25} = s \cdot (X'_r + X_m) \cdot \sqrt{\frac{X_m \cdot X'_r - (X - X_s)}{X_m + X'_r}} \cdot \frac{k + 25}{k + \theta_L}$$

Ec. 42

NOTA: Para valores de k referirse al [numeral 3.2.4.4](#).

Donde:

$\cos \varphi$: Factor de potencia en la prueba de carga.

$\cos \varphi_{rb}$: Factor de potencia en la prueba de rotor bloqueado.

$\cos \varphi_0$: Factor de potencia en la prueba de vacío.

f : Frecuencia de prueba [Hz].

f_N : Frecuencia nominal [Hz].

h : Altura estimada de la barra-conductor del rotor [m].

H : Altura del eje del rotor en [mm] según la IEC 60034-28 (NTC 5246, 2008), pero en la NEMA MG 1 – 2006 se define como D [inch].

I : Corriente de línea del estator [A].

I_m : Corriente magnetizante de fase [A].

I_s : Corriente de fase del estator [A].

- I_1 : Corriente medida en la prueba con carga [A].
- k_1 : Factor de efecto pelicular (skin) para inductancias.
- k_σ : Relación entre las inductancia de dispersión del estator y del rotor.
- L_m : Inductancia magnetizante [H].
- L_s : Inductancia de dispersión del estator [H].
- L'_r : Inductancia del rotor referida al estator [H].
- L_σ : Inductancia de dispersión total [H].
- $L_{\sigma a}$: Inductancia de dispersión total del estator sin el efecto pelicular [H].
- L_{ts} : Inductancia total del estator [H].
- n : Velocidad de operación [s^{-1}].
- n_{syn} : Velocidad nominal sincrónica [s^{-1}].

NOTA: Las unidades son SI, según el listado de la norma IEC 60027-1. La velocidad n es la frecuencia rotacional en s^{-1} (rev/ s). Los valores de la velocidad en min^{-1} (rev/ min) se deben dividir por 60.” (IEC 61972 (NTC 5293, 2004)), (p. 4).

- p : Número de pares de polos.
- P_0 : Potencia trifásica de entrada medida en la prueba sin carga [W].
- P_{fe} : Pérdida en el hierro [W].
- P_{fw} : Pérdidas por ventilación y fricción [W].
- P_K : Pérdidas constantes trifásicas [W].
- P_{rb} : Potencia de entrada trifásica para la prueba de rotor bloqueado [W].
- R : Resistencia de fase del motor [Ω].
- R_s : Resistencia monofásica del estator referida a una temperatura de operación en carga [Ω].

- R_{fe} : Resistencia equivalente a las pérdidas en el hierro [Ω].
- R'_{fe} : Resistencia equivalente a las pérdidas en el hierro corregida por frecuencia [Ω].
- $R'_{r,25}$: Resistencia del rotor referida al devanado del estator a la temperatura ambiente de 25 °C [Ω].
- R_s : Resistencia del estator referida a la temperatura ambiente de 25° C [Ω].
- s : Deslizamiento, en valor por unidad (p.u) de velocidad sincrónica.
- U : Tensión en los terminales del estator [V].
- U_m : Tensión magnetizante [V].
- U_N : Tensión nominal en los terminales [V].
- U_s : Tensión nominal de fase [V].
- U_1 : Tensión medida en la prueba con carga [V].
- X : Reactancia del motor [Ω].
- X'_r : Reactancia del rotor referida al estator [Ω].
- X_m : Reactancia de magnetización [Ω].
- X_s : Reactancia de dispersión del estator [Ω].
- X_{ts} : Reactancia total del estator [Ω].
- $X_{\sigma a}$: Reactancia de dispersión total del estator sin tener en cuenta el efecto pelicular [Ω].
- Z : Impedancia del motor [Ω].
- γ_r : Conductividad en el conductor del rotor [S/m].
- ξ : Factor de deslizamiento de corriente en el conductor del rotor.
- θ_L : Es la temperatura al final del ensayo con carga [°C].
- θ_{NL} : Es la temperatura al final del ensayo sin carga [°C].

3.6.2.2 Según la Norma IEEE Std 112-2004, Método 1

Esta norma presenta el circuito equivalente según la figura 3.6.3.

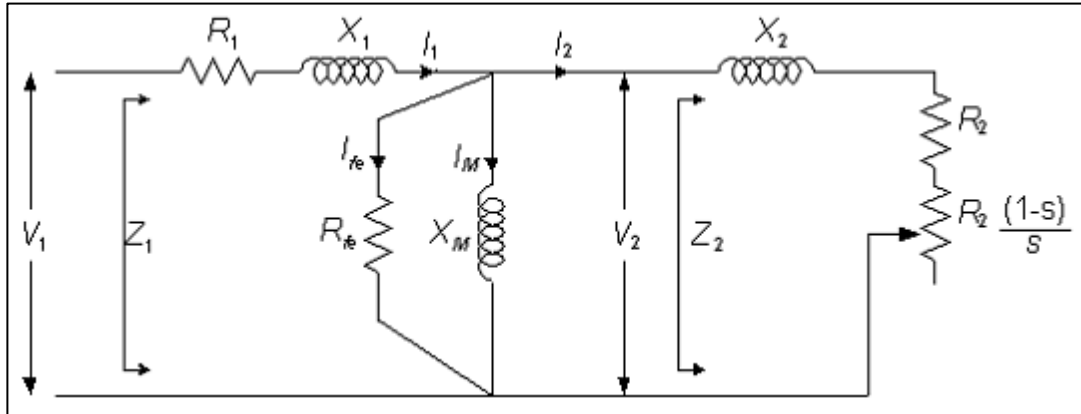


Figura 3.6.3. Circuito Equivalente. IEEE Std 112-2004. Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators (p. 24).

Además se enumera cuatro métodos para determinar los parámetros del circuito equivalente de la máquina asincrónica pero solo el primero de ellos es de interés, dado a que los demás poseen aplicaciones no relevantes para el estudio y este método es definido como el Método 1.

Método 1:

Dado que el Método 1 de la Norma IEEE Std 112–2004, para determinar los parámetros del circuito equivalente de la máquina asincrónica es exactamente el mismo definido como Método A de la guía de LME-EIE-UCV, se utilizará este último como referencia debido a que presenta una metodología de mejor comprensión. Este método se emplea para ensayos desarrollados a una frecuencia menor que el 25 % de su valor nominal.

Procedimiento (pp. 47 – 51):

Se deben conocer los siguientes datos:

- Resistencia del estator referida a 25° C.
- Tensión y corriente, por fase, en el estator durante la prueba en vacío $V_{1,0}$ y $I_{1,0}$ (a la tensión nominal).
- Potencia por fase consumida por la máquina en vacío $P_{1,0}$ (a la tensión nominal).
- Tensión y corriente, por fase en el estator consumida durante la prueba de rotor trabado, $V_{1,rb}$ y $I_{1,rb}$ (a la corriente nominal).
- Potencia por fase consumida por la máquina durante el ensayo de rotor trabado $P_{1,rb}$ (a la corriente nominal).

Para iniciar el cálculo se asume un valor para la relación de reactancia X_1/X_2 , si no se dispone como detalle de diseño, se usa la relación de reactancia según el código o "Letra Diseño" NEMA de la máquina:

$$\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 1,0 ; \text{ para rotor devanado y diseño A y D.}$$

$$\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 0,67 ; \text{ para diseño B.}$$

$$\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = 0,43 ; \text{ para diseño C.}$$

Calcule la potencia reactiva de los ensayos prueba de vacío y de rotor trabado, según las ecuaciones (43) y (44).

$$Q_{1,0} = \sqrt{(V_{1,0} \cdot I_{1,0})^2 - P_{1,0}^2}$$

Ec. 43

$$Q_{1,rb} = \sqrt{(V_{1,rb} \cdot I_{1,rb})^2 - P_{1,rb}^2}$$

Ec. 44

Según la Norma IEEE Std 112-2004 indica que se puede asumir cualquier valor inicial para $X_{M,0}$ y $X_{1,0}$, pero con el fin de acelerar la convergencia del método iterativo se recomienda calcular estos valores iniciales de $X_{M,0}$ y $X_{1,0}$, a partir de los datos de la prueba de vacío y de rotor trabado aplicando las ecuaciones (45) y (46).

$$X_{1,(0)} = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_{1,rb}}{I_{1,rb}}\right)^2 - \left(\frac{P_{1,rb}}{I_{1,rb}^2}\right)^2}}{1 + \frac{X_2}{X_1}}$$

Ec. 45

$$X_{M,(0)} = \left| \frac{V_{1,0}}{I_{1,0}} \cdot \left[\left(\frac{P_{1,0}}{V_{1,0} \cdot I_{1,0}} \right) - j \cdot \text{sen} \left(\text{Arc cos} \left(\frac{P_{1,0}}{V_{1,0} \cdot I_{1,0}} \right) \right) \right] - (R_1 + jX_{1,(0)}) \right|$$

Ec. 46

Determine iterativamente $X_{1,rb,(i)}$ y $X_{M,(i+1)}$, por medio de las ecuaciones (47) y (48). (Inicio del proceso iterativo).

$$X_{1,rb,(i)} = \frac{Q_{1,rb}}{I_{1,rb}^2 \cdot \left(1 + \frac{X_1}{X_2} + \frac{X_{1,(i)}}{X_{M,(i)}}\right)} \cdot \left(\frac{X_1}{X_2} + \frac{X_{1,(i)}}{X_{M,(i)}}\right)$$

Ec. 47

$$X_{M,(i+1)} = \frac{V_{1,0}^2}{Q_{1,0} - I_{1,0}^2 \cdot X_{1,(i)}} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{X_{1,(i)}}{X_{M,(i)}}}\right)^2$$

Ec. 48

Realice la corrección por frecuencia de $X_{1,rb,i}$ usando la ecuación (49).

$$X_{1,(i+1)} = \frac{f_N}{f_{CC}} \cdot X_{1,rb,(i)}$$

Ec. 49

Determine el error pertinente a X_1 y X_M , según las ecuaciones (50) y (51).

$$|X_{1,(i+1)} - X_{1,(i)}| \leq 0,001$$

Ec. 50

$$|X_{M,(i+1)} - X_{M,(i)}| \leq 0,001$$

Ec. 51

Repetir el proceso iterativo desde la ecuación (47) hasta que las condiciones del error se cumplan. Finalizado el proceso iterativo determine el valor de la reactancia del rotor referida al estator X_2 , por medio de la ecuación (52).

$$X_2 = \frac{X_{1,(i+1)}}{\frac{X_1}{X_2}}$$

Ec. 52

Determine el valor eficaz de la f.e.m inducida por fase E_0 , por medio de la ecuación (53) para los puntos medidos en la prueba de vacío, es decir, cuando el deslizamiento es muy cercano a cero ($s = 0$), y el valor de la impedancia estatórica.

$$E_0 = \left| (V_{1,0} \angle 0^\circ) - \left(I_{1,0} \angle -\text{Arc cos} \left(\frac{P_{1,0}}{V_{1,0} \cdot I_{1,0}} \right) \right) \cdot (R_1 + jX_{1,(i+1)}) \right|$$

Ec. 53

Donde la resistencia estatórica R_1 se obtiene según el [numeral 3.2](#) Medición y determinación de la resistencia estatórica y referida a 25 °C.

Grafique la potencia de entrada monofásica $P_{1,0}$ medida en la prueba en vacío, en función de tensión de fase al cuadrado E_0^2 . Interpole linealmente y encuentre el valor de las pérdidas mecánicas (monofásica) P_{mec} , cuando la tensión E_0^2 , tiene un valor nulo $P_{mec} = P_{(E_0^2=0)}$

Calcule las pérdidas en el hierro (monofásica) P_{fe} , usando la ecuación (54).

$$P_{fe} = P_{1,0} - P_{mec} - I_{1,0}^2 \cdot R_1$$

Ec. 54

Obtenga la conductancia equivalente a las pérdidas en el hierro G_{fe} , por la ecuación (55).

$$G_{fe} = \frac{P_{fe}}{V_{1,0}^2} \cdot \left(1 + \frac{X_{1,(i+1)}}{X_{M,(i+1)}}\right)^2$$

Ec. 55

Calcule la resistencia equivalente a las pérdidas en el hierro R_{fe} , a través de la ecuación (56).

$$R_{fe} = \frac{1}{G_{fe}}$$

Ec. 56

Determine por la ecuación (57) la resistencia del rotor referida al estator R_2 .

$$R_2 = \left(\frac{P_{1,rb}}{I_{1,rb}^2} - R_1\right) \cdot \left(1 + \frac{X_2}{X_{M,(i+1)}}\right)^2 - \frac{X_2^2}{X_{1(i+1)}^2} \cdot X_{1,rb}^2 \cdot G_{fe}$$

Ec. 57

Luego realice la corrección por temperatura de R_2 a una temperatura de 25 °C, según el [numeral 3.2.4.4](#), ecuación (2).

Fin del método.

Donde:

E_0 : Valor eficaz de la f.e.m inducida por fase, [V].

f_N : Frecuencia nominal, [Hz].

f_{CC} : Frecuencia de prueba u operación, [Hz].

G_{fe} : Conductancia equivalente a las pérdidas en el hierro, [S].

$I_{1,0}$: Corriente de fase medida en la prueba sin carga o vacío, [A].

$I_{1,rb}$: Corriente de fase medida en la prueba rotor bloqueado, [A].

$P_{1,0}$: Potencia monofásica consumida por la máquina en vacío, [W].

$P_{1,rb}$: Potencia monofásica consumida por la máquina en la prueba rotor bloqueado, [W].

P_{fe} : Pérdidas en el hierro (monofásica), [W].

P_{mec} : Pérdidas mecánicas (monofásica), [W].

$Q_{1,0}$: Potencia reactiva monofásica consumida por la máquina en vacío, [var].

$Q_{1,rb}$: Potencia reactiva monofásica consumida por la máquina en la prueba rotor bloqueado, [var].

R_1 : Resistencia estática, [Ω].

R_2 : Resistencia del rotor referida al estator, [Ω].

R_{fe} : Resistencia equivalente a las pérdidas en el hierro, [Ω].

s : Deslizamiento en valor por unidad (p.u) de velocidad sincrónica.

$V_{1,0}$: Tensión de fase aplicada al estator en la prueba sin carga, [V].

$V_{1,rb}$: Tensión de fase aplicada al estator en la prueba rotor bloqueado, [V].

X_1 : Reactancia estática, [Ω].

$X_{1,i}$: Reactancia estática en la iteración i , [Ω].

$X_{1,rb,i}$: Reactancia estática calculada de la prueba de rotor bloqueado en la iteración i , [Ω].

X_2 : Reactancia del rotor referida al estator, [Ω].

X_1/X_2 : Relación de reactancias.

$X_{M,i}$: Reactancia magnetizante en la iteración i , [Ω].

$(X_1 + X_M)$: Reactancia total sin carga, [Ω].

CAPÍTULO IV

APLICACIONES DE LAS PRUEBAS

4.1 Valores de placa de las máquinas utilizadas para el estudio

Banco 1 (para ver ubicación de las máquinas ver Anexo C, figura C1):

Tabla 4.1.1. *Máquina asincrónica (rotor bobinado) (Roja)*

General Electric			
Generator AC			
Model: 1G3975	Type. AHI		Frame: 326
From: CL	Phase: 3	Cycles: 60	kVA: 5
	Volts: 110 / 220	Amp: 26,6 / 13,1	Speed: 1200 rpm.
Excitation	125	3	
4 kW	0,8 p.f	Cont.	40 °C rise Stator Thermometer 60 °C rise rotor Resistance
Schenectady, NY Made in USA			
Serial UCV 08-36026			

Tabla 4.1.2. *Máquina sincrónica (Amarilla).*

WESTINGHOUSE	
Generador AC	
4,5 kVA	RPM 1000
Volt 120 / 208	Ext amp: 2,95
Amp 12,5	Ext volt: 125
Phase 1 - 3 - 6	Style 1-7B4839
P.f %: 90	
Cycles 50	
Serial UCV 08-36031	

Banco 3 (para ubicación de las máquinas ver Anexo C, figura C1):

Tabla 4.1.3. *Máquina DC (Azul).*

WESTINGHOUSE	
Motor DC	
6,5 HP	Type SK
115V	Frame 53
56 A	Style 7-B-4834
1000 RPM	Serial 7B4834
Generator DC	
Frame 53	
3 kW	
125 V	Style 7-B-4834
26,1 A	Serial 7B4834
1000 RPM	
Serial UCV 08-36025	

Tabla 4.1.4. *Máquina sincrónica (Amarilla)*

WESTINGHOUSE	
Generador AC	
3,5 kVA	P.f %: 90
Volt 120 / 208	Ext volt: 125
Amp 16,8 / 9,7	Ext amp: 3
Phase 1 - 3 - 6	Style 7B4833
Cycles 60	
RPM 1000	
Serial UCV 08-36024	

Tabla 4.1.5. *Máquina asincrónica rotor bobinado (Roja).*

General Electric		
Generator AC		
Model: 1G39	Type: AH - 1	Frame: 326
Form: CL	Phase: 3	kVA: 5
Volt: 110 / 220	Amp: 26,3 / 13,1	Speed: 1200 rpm.
Excitation: Volt 125 Amp 3		
4 kW	0,8 p.f	40 °C rise stator by thermometer 60 °C rise rotor by resiste
Instructor GEH- 1200		
Serial UCV 08-36026		

Tabla 4.1.6. *Máquina asincrónica (jaula de ardilla) (Verde).*

WESTINGHOUSE			
Type: CSP			Class
Frame: 324	line – line		60 cycles
Hp: 7,5	INDUCTOR MOTOR		Locked kVA Code G
3 Phases.			Style 7B4842
60 Cycles/ 50 Cycles			Serial 7B4842
Volt: 208/416	Amp: 25/12,5	Higher volt.	Lower volt.
Rpm: 960			
°C rise cont. 40	Serial UCV 08-36034		

4.2 Interpretación de los valores de placa de las máquinas asincrónicas seleccionadas como objetos de pruebas

La máquina seleccionada para la aplicación de las pruebas con el objetivo de la comparación entre las Normas IEEE Std 112-2004 y la IEC 60034-28, está dada según la [tabla 4.1.6](#) (**Máquina Asincrónica de rotor jaula de ardilla**).

Dado que esta primera máquina de estudio, presenta característica de potencia muy superiores a las otras máquinas presentes en el **banco 3**, resulta imposible cargarla nominalmente para un tiempo prolongado, según lo requerido para el objetivo de comprobación de potencia nominal. Entonces para cumplir con esto se cambia la máquina de estudio a la máquina descrita en la [tabla 4.1.5](#) (**Máquina Asincrónica de rotor bobinado y color roja**).

Es importante destacar que los ensayos y condiciones conocidos de forma general en el Capítulo III, se presentan particularizados para su aplicación en el LME

y que los instrumentos o elemento disponibles en el mismo para el desarrollo de estas pruebas deben cumplir con las condiciones generales y particulares establecidos en el Capítulo III.

Antes de aplicar los ensayos es necesario saber el significado técnico de las indicaciones en la placa de la máquina de estudio (asincrónica jaula de ardilla), de las cuales algunas no resultan una información directa, sino que requiere verificación respecto a la Norma *NEMA (National Electric Manufacturers Association) Standards Publication MG 1-2006. Motors and Generators.*

Por medio la Norma NEMA MG 1-2006. Artículo 2.62 (parte 2, p. 28), se encontró que según para la máquina de estudio (jaula de ardilla) el marcado de los terminales para la conexión en alta tensión (416 V), la máquina posee una configuración delta larga mientras en baja tensión (208 V) es una doble delta en paralelo o delta corta. Debido a estas configuraciones se determinó que la máquina posee una conexión interna dada la figura 4.2.1 y donde la configuración trabajada en la máquina para los distintos ensayos en el LME de la EIE-UCV es un nivel de tensión línea a línea de 208 V, el único nivel disponible en el laboratorio durante el desarrollo de este trabajo.

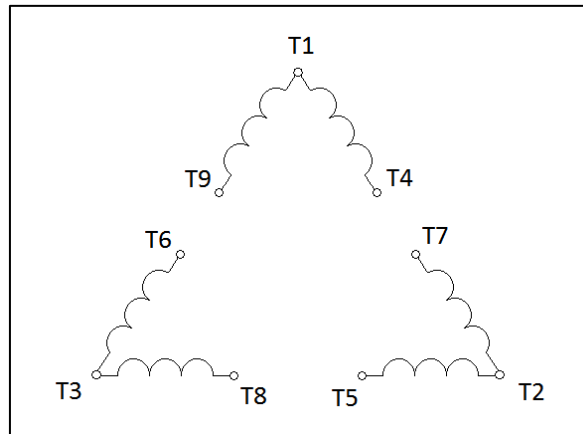


Figura 4.2.1. Conexión interna de la máquina jaula de ardilla para el estudio de comparación de normas.

Con esta norma también se puede determinar la corriente de arranque que se interpreta por medio del código letra de la máquina, dada la información de la placa, la letra código “G” según Artículo 10.37 (parte 10, p. 8) corresponde a un rango de 5,6 a 6,3 kVA / Hp, con lo que se puede calcular la corriente de arranque pero con el fin de evitar daños en los instrumentos debido a esta corriente, que puede ser de 4,66 hasta 5,25 veces la nominal, se recomienda el uso del variac para incrementar la tensión y así tener un control sobre la corriente, además teniendo puenteado (en corto) cada transformador de corriente en el lado de los instrumentos, mientras se incrementa la tensión para evita daños en estos.

Haciendo uso de los parámetros del circuito equivalente los cuales se presenta en los numerales 4.10 y 4.11 de este trabajo, se determinó la corriente de arranque en función de la corriente nominal de la máquina y se obtuvo los siguientes resultados. En base a la norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) la corriente de arranque es 3,05 veces la corriente nominal, mientras en base a la IEEE Std 112-2004 la corriente de arranque es 4,19 veces la corriente nominal de la máquina. Observando que dicho valores se encuentran por debajo del rango esperado, esto puede interpretarse como

que el motor se encuentra sobredimensionado dado a que fue diseñado con finalidades académicas y en consecuencia puede estar expuesto a sobrecargas.

En el caso de la máquina asincrónica de rotor bobinado presenta una conexión en estrella larga (dos bobinas en serie por fase) a una tensión alta de 208 V mostrada en la figura 4.2.2.

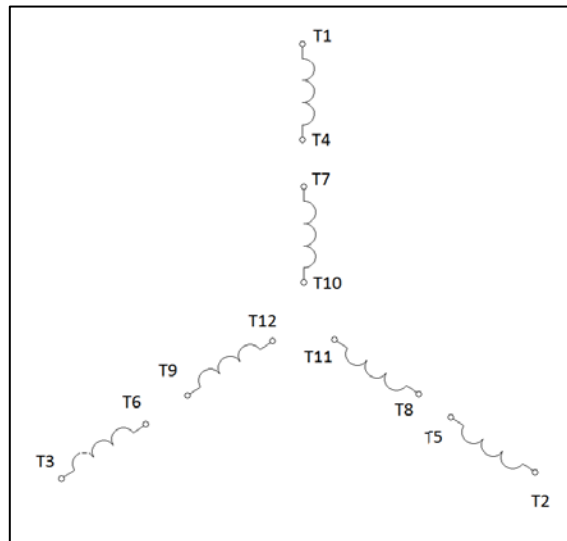


Figura 4.2.2. Conexión interna de la máquina asincrónica rotor bobinado para el estudio de aumento de temperatura y potencia nominal.

4.3 Comprobación de las condiciones sobre la red de alimentación

Dado que las normas exigen unas condiciones respecto al sistema de alimentación de la máquina según el [numeral 3.1](#) Condiciones generales de los ensayos. Se comprueba el desbalance en tensión y la desviación máxima en frecuencia del sistema de alimentación para las máquinas y donde ambos valores no deben ser superiores al 0,5 %.

4.3.1 Desbalance en tensión

Con las siguientes tensiones medidas y con las ecuaciones (58), (59) y (60), se determina el desbalance de tensión sobre la red de alimentación.

Instrumento:

Multímetro digital Fluke 175 True RMS.

Mediciones:

Tabla 4.3.1. *Mediciones de tensión sobre la red de alimentación.*

Tensión del línea	Valor de tensión [V]	Error
V_1	210,10	0,01
V_2	209,50	0,01
V_3	210,00	0,01

Tensión promedio:

$$V_p = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} = \frac{210,10 \text{ V} + 209,50 \text{ V} + 210,00 \text{ V}}{3} = \mathbf{209,867 \text{ V.}}$$

Ec. 58

Máxima desviación en tensión M_D :

$$M_D = |V_p - V_i| = |209,867 \text{ V} - 209,50 \text{ V}| = \mathbf{0,367 \text{ V.}}$$

Ec. 59

Desbalance en tensión DT :

$$DT = \frac{M_D}{V_p} \cdot 100 = \frac{0,367 V}{209,867 V} \cdot 100 = \mathbf{0,175 \%}$$

Ec. 60

Donde:

V_1 : Tensión de línea medida entre la fase A y B [V].

V_2 : Tensión de línea medida entre la fase B y C [V].

V_3 : Tensión de línea medida entre la fase C y A [V].

V_p : Tensión promedio de las tensiones medidas [V].

V_i : Tensión medida que hace mayor diferencia con la V_p [V].

M_D : Máxima desviación en tensión [V].

DT : Desbalance en tensión [%].

4.3.2 Máxima desviación en frecuencia porcentual

Con la siguiente frecuencia medida y con la ecuación (61), se determina la máxima desviación en frecuencia porcentual sobre la red de alimentación.

Instrumento:

Multímetro digital Fluke 175 True RMS.

Mediciones:

Tabla 4.3.2. *Datos de frecuencia sobre la red de alimentación.*

Frecuencia	Valor [Hz]	Error
f_n	60	-
f_{exp}	60,02	0,01

Máxima desviación porcentual en frecuencia:

$$MDF \% = \frac{|f_n - f_{exp}|}{f_n} \cdot 100 = \frac{|60 \text{ Hz} - 60,02 \text{ Hz}|}{60 \text{ Hz}} \cdot 100 = \mathbf{0,03 \%}.$$

Ec. 61

Donde:

f_n : Frecuencia nominal de la red. [Hz].

f_{exp} : Frecuencia medida sobre la red [Hz].

MDF %: Máxima desviación porcentual en frecuencia [%].

4.4 Método Amperímetro – Voltímetro

4.4.1 Diagrama de conexiones

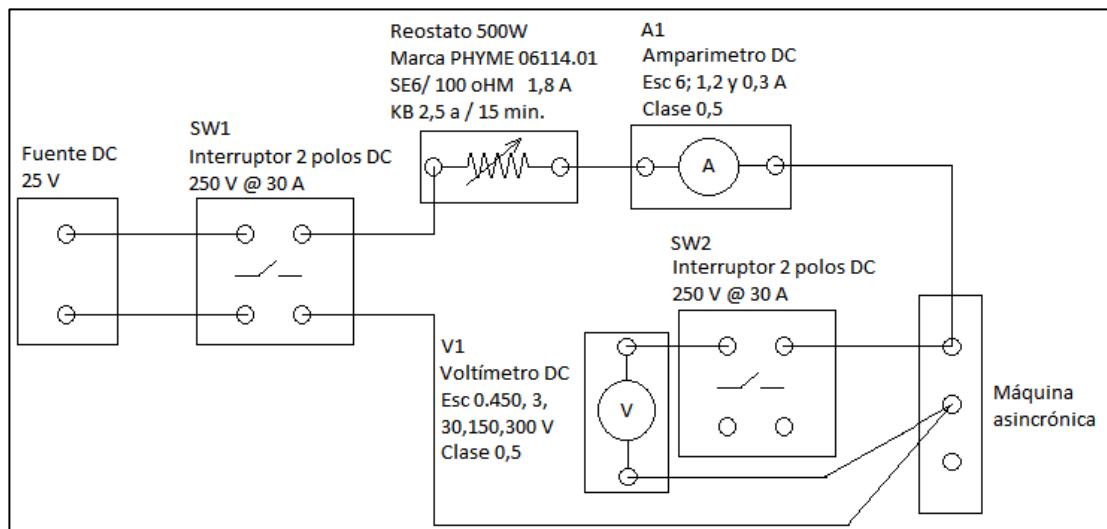


Figura 4.4.1. Diagrama de conexiones. Método Amperímetro – Voltímetro.

4.4.2 Condiciones del ensayo

- Corriente máxima 10 % de la corriente nominal a pesar que el [numeral 3.2.2](#) indica como máxima 15 % de la corriente nominal ($I_{max} = 2,5 A$).
- La resistencia limitadora (Reostato) antes de iniciar el ensayo debe ser ajustada a su máximo valor resistivo para tomar mediciones crecientes en corriente y tensión.
- Se requiere un mínimo de diez mediciones y el tiempo de registro entre cada medición debe hacerse entre 30 a 60 s.

- Tensión máxima en los terminales del devanado 2,5 V, según cálculos previos.

4.4.3 Instrumentos y equipos, disponibles en el LME de la EIE-UCV

- Conductores aislados flexible mínimo de 7 hilos, de calibre mínimo 14 AWG de cobre.
- Amperímetro (A1) tipo hierro móvil, AC – DC, clase 0,5 , uso en posición horizontal, escalas de 6 – 1,2 y 0,3 A, marca Trub Tauber Zurich, serial UCV 08-9388.
- Voltímetro (V1) DC, del tipo bobina móvil, clase 0,5 , de resistencia interna de 1000 Ω , de posición horizontal y maneja las escalas de 450m, 3, 30, 150 y 300 V, marca Siemens, modelo Q23P4-111 y serial UCV 08-9249.
- Resistencia limitadora (Reostato) marca PHYME 06114.01, SE6 / 100 Ω 1,8 A, KB 2,5 A / 15 min, 500 W y serial UCV 08-23952.
- Dos Interruptores (SW1 y SW2) de dos polos DC, de 250 V y 30 A.
- Termómetro digital marca 3M Company, modelo IR-16EXL3 y made in de USA mayo 1998.

4.4.4 Datos experimentales y determinaciones

Dado a que se desea medir la resistencia por fase de la máquina en configuración delta en paralelo, esto equivale a medir la resistencia total entre dos bobinas conectadas en paralelo, para ello se utiliza en ventaja la conexión interna de la máquina según su diseño, ver [figura 4.2.1](#) del [numeral 4.2](#), Interpretación de los valores de placa de la máquina asincrónica.

Para la determinación de la resistencia de cada fase se aplicó la ecuación (1) del [numeral 3.2.4.1](#) (Procedimiento. Método Amperímetro - Voltímetro).

Dato necesario del voltímetro:

Resistencia interna del instrumento:

$$R_v [\Omega] = 1000.$$

A continuación se presenta los resultados del experimento en las tablas 4.4.1, 4.4.2 y 4.4.3.

Mediciones de corriente y tensión para la determinación de la resistencia de fase A:

Unión de T4 con T9 y medición entre T1 y T4.

Tabla 4.4.1. Mediciones para determinar la resistencia de fase A.

Medición	I [A]	$\pm\Delta I$ [A]	Esc [A]	V [V]	$\pm\Delta V$ [V]	Esc [V]	Ra [Ω]	$\pm\Delta Ra$ [Ω]
1	0,52	0,02	2,5	0,40	0,05	3	0,77	0,13
2	0,70	0,02	2,5	0,50	0,05	3	0,71	0,09
3	0,82	0,02	2,5	0,60	0,05	3	0,73	0,08
4	1,02	0,02	2,5	0,75	0,05	3	0,74	0,06
5	1,12	0,02	2,5	0,85	0,05	3	0,76	0,06
6	1,20	0,02	2,5	0,90	0,05	3	0,75	0,05
7	1,42	0,02	2,5	1,10	0,05	3	0,78	0,05
8	1,58	0,02	2,5	1,20	0,05	3	0,76	0,04
9	1,80	0,02	2,5	1,40	0,05	3	0,78	0,04
10	2,00	0,02	2,5	1,55	0,05	3	0,78	0,03
Promedio							0,76	0,06

Mediciones de corriente y tensión para la determinación de la resistencia de fase B:

Unión de T5 con T7 y medición entre T2 y T5.

Tabla 4.4.2. Mediciones para determinar la resistencia de fase B.

Medición	I [A]	$\pm\Delta I$ [A]	Esc [A]	V [V]	$\pm\Delta V$ [V]	Esc [V]	Rb [Ω]	$\pm\Delta Rb$ [Ω]
1	0,60	0,02	2,5	0,45	0,05	3	0,75	0,11
2	0,70	0,02	2,5	0,55	0,05	3	0,79	0,09
3	0,90	0,02	2,5	0,70	0,05	3	0,78	0,07
4	1,00	0,02	2,5	0,80	0,05	3	0,80	0,07
5	1,18	0,02	2,5	0,95	0,05	3	0,81	0,06
6	1,48	0,02	2,5	1,20	0,05	3	0,81	0,04
7	1,80	0,02	2,5	1,40	0,05	3	0,78	0,04
8	1,90	0,02	2,5	1,50	0,05	3	0,79	0,03
9	2,10	0,02	2,5	1,70	0,05	3	0,81	0,03
10	2,20	0,02	2,5	1,75	0,05	3	0,80	0,03
Promedio							0,79	0,06

Mediciones de corriente y tensión para la determinación de la resistencia de fase C:

Unión de T6 con T8 y medición entre T3 y T6.

Tabla 4.4.3. Mediciones para determinar la resistencia de fase C.

Medición	I [A]	±ΔI [A]	Esc [A]	V [V]	±ΔV [V]	Esc [V]	Rc [Ω]	±ΔRc [Ω]
1	0,70	0,02	2,5	0,55	0,05	3	0,79	0,09
2	0,90	0,02	2,5	0,70	0,05	3	0,78	0,07
3	1,00	0,02	2,5	0,75	0,05	3	0,75	0,07
4	1,16	0,02	2,5	0,90	0,05	3	0,78	0,06
5	1,32	0,02	2,5	1,00	0,05	3	0,76	0,05
6	1,50	0,02	2,5	1,15	0,05	3	0,77	0,04
7	1,68	0,02	2,5	1,30	0,05	3	0,77	0,04
8	1,82	0,02	2,5	1,40	0,05	3	0,77	0,04
9	2,04	0,02	2,5	1,55	0,05	3	0,76	0,03
10	2,34	0,02	2,5	1,85	0,05	3	0,79	0,03
Promedio							0,77	0,05

En la siguiente tabla 4.4.4 se presenta un resumen de los valores promedio de resistencia de cada fase.

Tabla 4.4.4. Resistencias de fase A, B y C.

	Ra [Ω]	±ΔRa [Ω]	Rb [Ω]	±ΔRb [Ω]	Rc [Ω]	±ΔRc [Ω]
Promedio	0,77	0,06	0,77	0,06	0,77	0,05

Y con los resultados anteriores se obtiene la resistencia promedio de las resistencias de fase:

$$R1 [\Omega] @ T1[^\circ C] = (0,77 \pm 0,06)\Omega @ (24,0 \pm 0,1)^\circ C$$

Datos de temperatura:

T1= 24° C (temperatura del devanado al inicio de la prueba).

T2= 25° C (temperatura a la que hay que referir la resistencia).

Con la resistencia promedio de fase $R1$, los datos de temperatura y utilizando la ecuación (3) del [numeral 3.2.4.4](#) (Cálculos para la determinación de la resistencia estática), se obtiene la resistencia de fase promedio o la resistencia estática $R1$, referida a una temperatura ambiente estandarizada de 25° C según las Normas IEEE Std 112-2004 y la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).

Resistencia estática referida a 25° C:

$$R2 [\Omega] @ T2[^\circ\text{C}] = (0,78 \pm 0,06)\Omega @ (25,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$$

4.5 Método del Amperímetro

4.5.1 Diagrama eléctrico

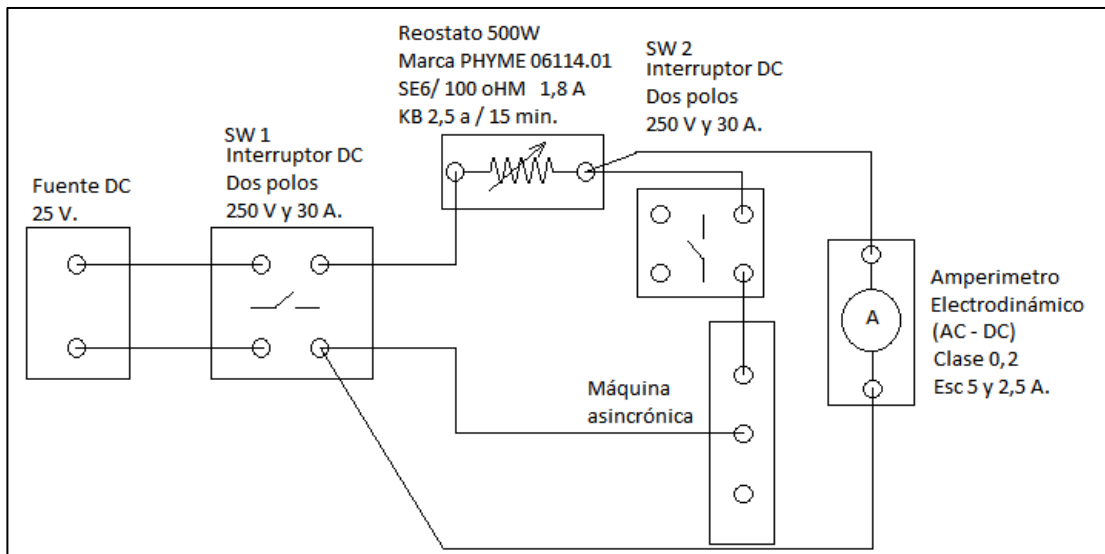


Figura 4.5.1. Diagrama de conexiones. Método del Amperímetro.

4.5.2 Condiciones del ensayo

- Corriente máxima 10 % de la corriente nominal a pesar que el [numeral 3.2.2](#) indica como máxima 15 % de la corriente nominal ($I_{max} = 2,5 A$), esta corriente es a interruptor SW 2 abierto.
- La resistencia limitadora (Reostato) antes de iniciar el ensayo debe ser ajustada a su máximo valor resistivo para tomar mediciones crecientes en corriente y tensión.
- Se requiere un mínimo de diez mediciones y el tiempo de registro entre cada medición debe hacerse entre 30 a 60 s.

4.5.3 Instrumentos y equipos, disponibles en el LME de la EIE-UCV

- Conductores aislados flexible mínimo de 7 hilos, de calibre mínimo 14 AWG de cobre.
- Amperímetro (A1) tipo electrodinámico, AC – DC, clase 0,2 , resistencia interna de 0,28 y 1,12 Ω , escalas de 5 y 2,5 A, uso en posición horizontal, marca Trub Tauber Zurich, serial UCV 08-9047.
- Resistencia limitadora de 500 W (Reostato), marca PHYME 06114.01, SE6 / 100 Ω - 1,8 A, KB 2,5 A / 15 min y serial UCV 08-23952.
- Dos interruptores (SW1 y SW2) DC, dos polos, de 250 V y 30 A.
- Termómetro digital marca 3M Company, modelo IR-16EXL3 y made in de USA mayo 1998.

4.5.4 Datos experimentales y determinaciones

Dado a que se desea medir la resistencia por fase de la máquina en configuración delta en paralelo, esto equivale a medir la resistencia total entre dos bobinas conectadas en paralelo, para ello se utiliza en ventaja la conexión interna de la máquina según su diseño, ver [figura 4.2.1](#) del [numeral 4.2](#), Interpretación de los valores de placa de la máquina asincrónica.

Para la determinación de la resistencia de cada fase se aplicó la ecuación (2) del [numeral 3.2.4.2](#) (Procedimiento. Método del Amperímetro).

Dato necesario del amperímetro:

Resistencia interna del instrumento:

$$R_a [\Omega] = 1,12$$

A continuación se presenta los resultados del experimento en las tablas 4.5.1, 4.5.2 y 4.5.3.

Mediciones de corriente y tensión para la determinación de la resistencia de fase A:

Unión de T4 con T9 y medición entre T1 y T4.

Tabla 4.5.1. Mediciones para determinar la resistencia de fase A.

Mediciones	SW 2 abierto			SW 2 cerrado			Ra [Ω]	±ΔRa [Ω]
	I1 [A]	±ΔI1 [A]	Esc [A]	I2 [A]	±ΔI2 [A]	Esc [A]		
1	0,88	0,02	2,5	0,40	0,02	2,5	0,93	0,12
2	1,00	0,02	2,5	0,44	0,02	2,5	0,88	0,10
3	1,08	0,02	2,5	0,54	0,02	2,5	1,12	0,12
4	1,30	0,02	2,5	0,60	0,02	2,5	0,96	0,09
5	1,42	0,02	2,5	0,64	0,02	2,5	0,92	0,08
6	1,60	0,02	2,5	0,70	0,02	2,5	0,87	0,06
7	1,86	0,02	2,5	0,84	0,02	2,5	0,92	0,06
8	2,02	0,02	2,5	0,90	0,02	2,5	0,90	0,05
9	2,20	0,02	2,5	1,02	0,02	2,5	0,97	0,05
10	2,44	0,02	2,5	1,12	0,02	2,5	0,95	0,05
Promedio							0,94	0,08

Mediciones de corriente y tensión para la determinación de la resistencia de fase B:

Unión de T5 con T7 y medición entre T2 y T5.

Tabla 4.5.2. Mediciones para determinar la resistencia de fase B.

Mediciones	SW 2 abierto			SW 2 cerrado			Rb [Ω]	±ΔRb [Ω]
	I1 [A]	±ΔI1 [A]	Esc [A]	I2 [A]	±ΔI2 [A]	Esc [A]		
1	0,92	0,02	2,5	0,40	0,02	2,5	0,86	0,11
2	1,10	0,02	2,5	0,54	0,02	2,5	1,08	0,12
3	1,28	0,02	2,5	0,56	0,02	2,5	0,87	0,08
4	1,44	0,02	2,5	0,64	0,02	2,5	0,90	0,07
5	1,68	0,02	2,5	0,78	0,02	2,5	0,97	0,07
6	1,80	0,02	2,5	0,80	0,02	2,5	0,90	0,06
7	2,06	0,02	2,5	0,92	0,02	2,5	0,90	0,05
8	2,18	0,02	2,5	0,96	0,02	2,5	0,88	0,05
9	2,22	0,02	2,5	0,96	0,02	2,5	0,85	0,04
10	2,40	0,02	2,5	1,04	0,02	2,5	0,86	0,04
Promedio							0,91	0,07

Mediciones de corriente y tensión para la determinación de la resistencia de fase C:

Unión de T6 con T8 y medición entre T3 y T6.

Tabla 4.5.3. Mediciones para determinar la resistencia de fase C.

Mediciones	SW 2 abierto			SW 2 cerrado			Rc [Ω]	±ΔRc [Ω]
	I1 [A]	±ΔI1 [A]	Esc [A]	I2 [A]	±ΔI2 [A]	Esc [A]		
1	0,96	0,02	2,5	0,40	0,02	2,5	0,80	0,10
2	1,14	0,02	2,5	0,48	0,02	2,5	0,81	0,08
3	1,32	0,02	2,5	0,60	0,02	2,5	0,93	0,08
4	1,52	0,02	2,5	0,64	0,02	2,5	0,81	0,06
5	1,70	0,02	2,5	0,68	0,02	2,5	0,75	0,05
6	1,84	0,02	2,5	0,74	0,02	2,5	0,75	0,05
7	2,08	0,02	2,5	0,86	0,02	2,5	0,79	0,04
8	2,22	0,02	2,5	0,94	0,02	2,5	0,82	0,04
9	2,34	0,02	2,5	0,98	0,02	2,5	0,81	0,04
10	2,42	0,02	2,5	1,02	0,02	2,5	0,82	0,04
Promedio							0,81	0,06

En la siguiente tabla 4.5.4 se presenta un resumen de los valores promedio de resistencia de cada fase.

Tabla 4.5.4. Resistencias de fase A, B y C.

	Ra [Ω]	±ΔRa [Ω]	Rb [Ω]	±ΔRb [Ω]	Rc [Ω]	±ΔRc [Ω]
Promedio	0,94	0,08	0,91	0,07	0,81	0,06

Y con los resultados anteriores se obtiene la resistencia promedio de las resistencias de fase:

$$R1 [\Omega] @ T1[^\circ C] = (0,89 \pm 0,07)\Omega @ (24,0 \pm 0,1)^\circ C$$

Datos de temperatura:

T1= 24° C (temperatura del devanado al inicio de la prueba).

T2= 25° C (temperatura a la que hay que referir la resistencia).

Con la resistencia promedio de fase $R1$, los datos de temperatura y utilizando la ecuación (3) del [numeral 3.2.4.4](#) (Cálculos para la determinación de la resistencia estatórica), se obtiene la resistencia de fase promedio o la resistencia estatórica $R1$, referida a una temperatura ambiente estandarizada de 25° C según las Normas IEEE Std 112-2004 y la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).

Resistencia estatórica referida a 25° C:

$$R2 [\Omega] @ T2[^\circ\text{C}] = (0,89 \pm 0,07)\Omega @ (25,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$$

4.6 Medición por óhmetro tipo puente

4.6.1 Puente de Kelvin-Thomson

4.6.1.1 Diagrama de conexiones

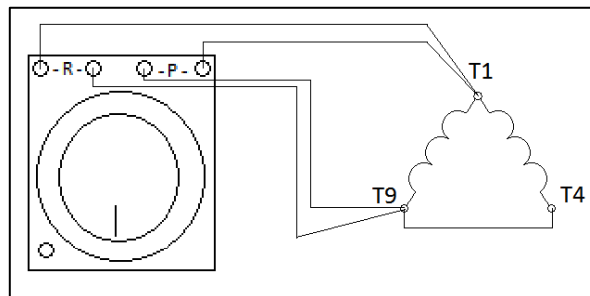


Figura 4.6.1. Diagrama de conexiones para el puente Kelvin.

Dado a que se desea medir la resistencia por fase de la máquina en configuración delta en paralelo, esto equivale a medir la resistencia total entre dos bobinas conectadas en paralelo, para ello se utiliza en ventaja la conexión interna de

la máquina según su diseño, ver [figura 4.2.1](#) del [numeral 4.2](#), Interpretación de los valores de placa de la máquina asincrónica.

Es importante realizar las conexiones según lo indica la anterior figura 4.6.1 dado que el instrumento opera en corriente continua, en caso de una conexión incorrecta con el cableado del instrumento, este opera sin encontrar el valor de la resistencia de interés.

4.6.1.2 Instrumentos y equipos, disponibles en el LME de la EIE-UCV

- Óhmetro tipo puente de Kelvin, bobina móvil, DC, uso en posición horizontal, escalas de 0,01 ; 0,1 y 1 Ω , marca Trub Teuber Zurich, serial EIE2012.113.
- Conductores aislados flexible mínimo de 7 hilos, de calibre mínimo 14 AWG de cobre.
- Termómetro digital marca 3M Company, modelo IR-16EXL3 y made in de USA mayo 1998.

4.6.1.3 Datos experimentales y determinaciones

En la tabla 4.6.1 se indica las mediciones directas de cada fase de la máquina identificada según las conexiones de los terminales.

Tabla 4.6.1. Resistencias de fase A, B y C.

Terminales	Rfase	Rx [Ω]	$\pm\Delta R_x$ [Ω]
T1, T4 con T9	RA	0,80	0,01
T2, T5 con T7	RB	0,80	0,01
T3, T6 con T8	RC	0,80	0,01

Datos de temperatura:

T1= 24° C (temperatura del devanado al inicio de la prueba).

T2= 25° C (temperatura a la que hay que referir la resistencia).

Resistencia promedio de las resistencias de fase referida a 24° C:

$$R1 [\Omega] @ T1[^\circ C] = (0,80 \pm 0,01)\Omega @ (24,0 \pm 0,1)^\circ C$$

Con la resistencia promedio de fase $R1$, los datos de temperatura y utilizando la ecuación (3) del [numeral 3.2.4.4](#) (Cálculos para la determinación de la resistencia estática), se obtiene la resistencia de fase promedio o la resistencia estática $R1$, referida a una temperatura ambiente estandarizada de 25° C según las Normas IEEE Std 112-2004 y la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).

Resistencia estática referida a 25° C:

$$R2 [\Omega] @ T2[^\circ C] = (0,80 \pm 0,01)\Omega @ (25,0 \pm 0,1)^\circ C$$

4.6.2 Puente de Wheatstone

4.6.2.1 Diagrama de conexiones

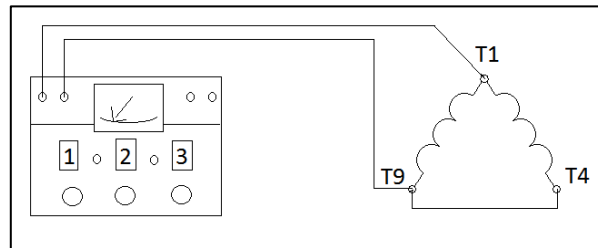


Figura 4.6.2. Diagrama de conexiones para el puente Wheatstone.

Dado a que se desea medir la resistencia por fase de la máquina en configuración delta en paralelo, esto equivale a medir la resistencia total entre dos bobinas conectadas en paralelo, para ello se utiliza en ventaja la conexión interna de la máquina según su diseño, ver [figura 4.2.1](#) del [numeral 4.2](#), Interpretación de los valores de placa de la máquina asincrónica.

4.6.2.2 Instrumentos y equipos, disponibles en el LME de la EIE-UCV

- Óhmetro tipo puente de Wheatstone, AC y DC, uso en posición horizontal, Escalas de Ω y $k\Omega$, marca Metrapoint, modelo Wheatstone II y serial UCV 08-24528.
- Conductores aislados flexible mínimo de 7 hilos, de calibre mínimo 14 AWG de cobre.
- Termómetro digital marca 3M Company, modelo IR-16EXL3 y made in de USA mayo 1998.

4.6.2.3 Datos experimentales y determinaciones

En la tabla 4.6.2 se puede leer los datos de las mediciones realizadas para la prueba.

Tabla 4.6.2. Resistencias de fase A, B y C.

Terminales	Rfase	Rx [Ω]	$\pm\Delta Rx$ [Ω]	Esc. usada
T1, T4 con T9	RA	0,80	0,01	en Ω
T2, T5 con T7	RB	0,80	0,01	en Ω
T3, T6 con T8	RC	0,80	0,01	en Ω

Datos de temperatura:

T1= 24° C (temperatura del devanado al inicio de la prueba).

T2= 25° C (temperatura a la que hay que referir la resistencia).

Resistencia promedio de las resistencias de fase referida a 24° C:

$$\mathbf{R1 [\Omega] @ T1[^\circ C] = (0,80 \pm 0,01)\Omega @ (24,0 \pm 0,1)^\circ C}$$

Con la resistencia promedio de fase R1, los datos de temperatura y utilizando la ecuación (3) del [numeral 3.2.4.4](#) (Cálculos para la determinación de la resistencia estática), se obtiene la resistencia de fase promedio o la resistencia estática R1, referida a una temperatura ambiente estandarizada de 25° C según las Normas IEEE Std 112-2004 y la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).

Resistencia estática referida a 25° C:

$$\mathbf{R2 [\Omega] @ T2[^\circ C] = (0,80 \pm 0,1)\Omega @ (25,0 \pm 0,1)^\circ C}$$

4.7 Prueba con carga

4.7.1 Diagrama de conexiones

Conexión de la máquina como objeto del estudio:

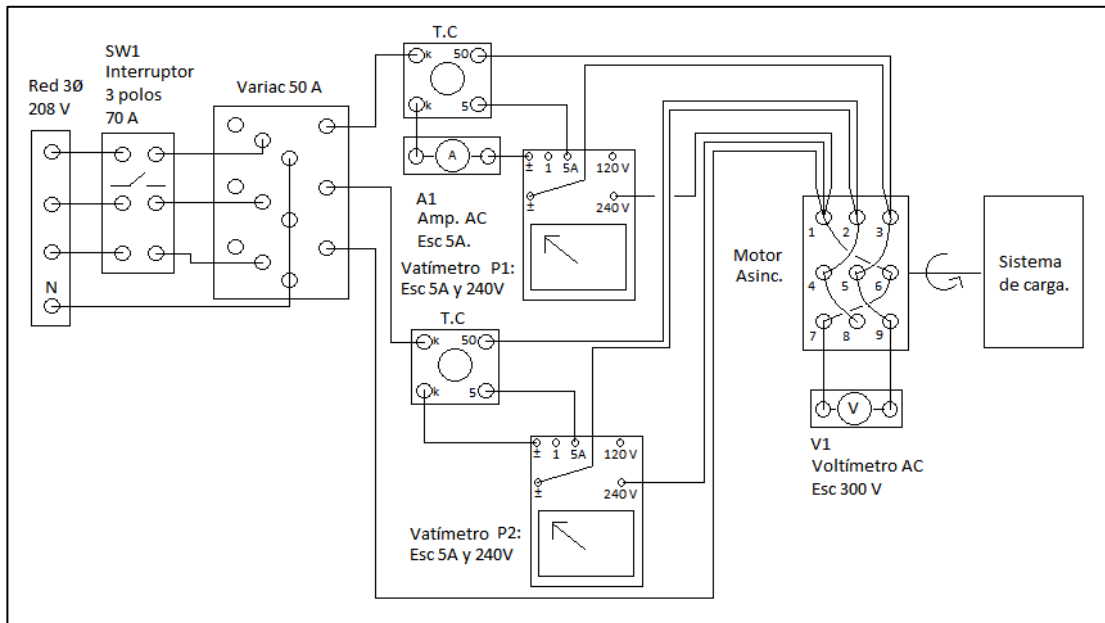


Figura 4.7.1. Diagrama de conexiones en la máquina de estudio (jaula de ardilla), prueba con carga.

Conexión de las máquinas como sistema de carga para el motor asincrónico (objeto del estudio):

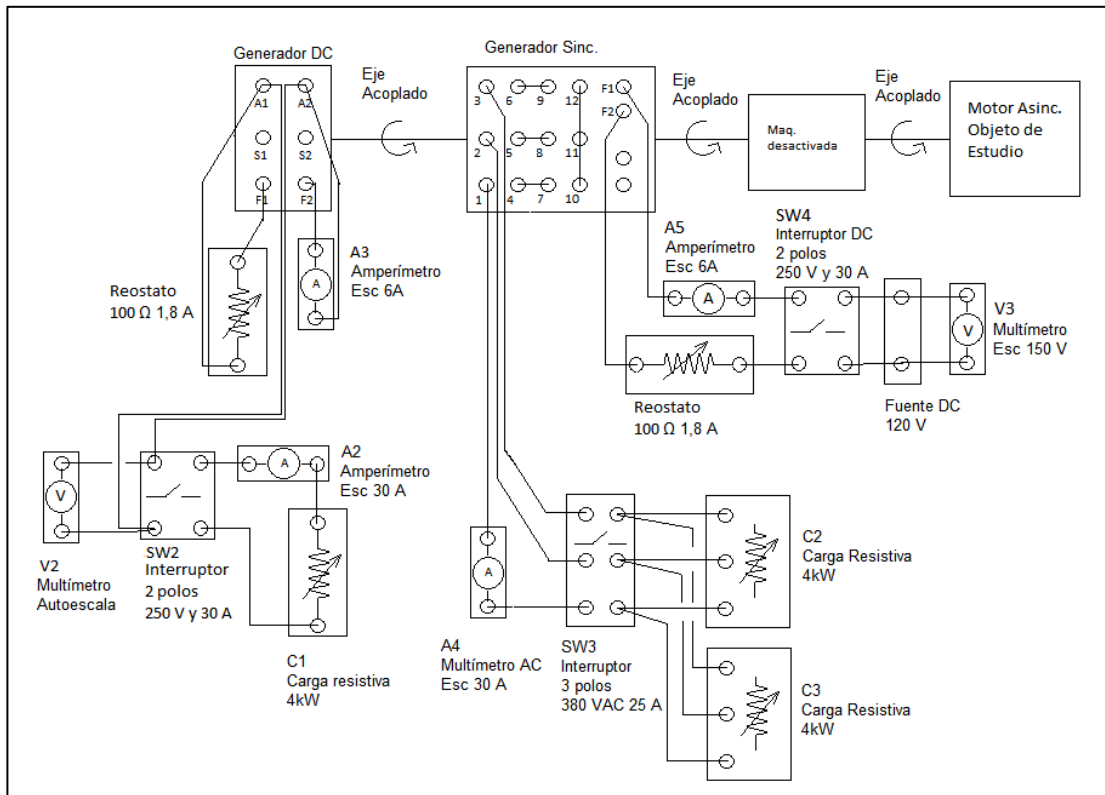


Figura 4.7.2. Diagrama de conexiones en el sistema de carga del motor jaula de ardilla, prueba con carga.

4.7.2 Condiciones del ensayo

- La carga máxima no excederá el 150 % de la carga nominal ($I_{max} = 37,5 A$).
- La máquina deberá estar en modo motor para la prueba.
- Antes de comenzar el ensayo los transformadores de corriente debe estar en condición de corto para evitar daños en los equipos si se arranca a tensión nominal.

- Las mediciones se deben realizar lo más rápido que sea posible para minimizar los cambios de temperatura en la máquina durante el ensayo.
- Cuando se aplica la carga al motor, se empieza en la carga más alta y se continúa descendiendo hasta llegar al valor más bajo para realizar las mediciones.

4.7.3 Instrumentos y equipos, disponibles en el LME de la EIE-UCV

Para el motor jaula de ardilla (objeto de estudio, verde, banco 3) (valores de placa ver la [tabla 4.1.6](#) del [numeral 4.1](#)):

- Conductores aislados flexible mínimo de 7 hilos, de calibre mínimo 8 AWG de cobre.
- Interruptor automático (SW1) AC, 3 polos, 70 A, 600 V, marca Disjoncteur (se recomienda un interruptor de 50 A). EIE2012.412.
- Dos vatímetros (P1 y P2) del tipo electrodinámico, marca Yokogama, modelo 2041, AC y DC, uso de posición horizontal, escala en la bobina voltimétrica de 120 y 240 V, escala de bobina amperimétrica de 1 y 5 A, para aplicar método de los dos vatímetros, seriales EIE2012.062 y EIE2012.063.
- Dos transformadores de corriente (T.C), marca Stormwandler, 5 VA, corriente de entrada 5, 10, 25 y 50 A, corriente de salida 5 A, seriales EIE2012.207 y EIE2012.210.

- Amperímetro (A1) tipo electrodinámico, AC – DC, clase 0,2 , uso en posición horizontal, escalas de 5 y 2,5 A, resistencia interna 0,28 y 1,12 Ω , marca Trub Tauber Zurich, serial UCV 08-9047.
- Voltímetro (V1) tipo electrodinámico, AC – DC, clase 0,2 , uso en posición horizontal, escalas de 150, 300, 450 y 600 V, resistencia interna 32,93 Ω/V , marca Trub Tauber Zurich, serial UCV 08-9033.
- Variac trifásico, valores por fase: 7 kVA, 50 A, 120 V input, 0 a 140 V out, marca Powerstat y serial EIE2012.446.
- Cuenta revoluciones o tacómetro, marca Hasteragbern y serial EIE2012.079.
- Óhmetro tipo puente de Kelvin, bobina móvil, DC, uso en posición horizontal, Escalas de 0,01 ; 0,1 y 1 Ω , marca Trub Teuber Zurich, serial EIE2012.113.

Para el generador DC (Azul, banco 3) (valores de placa ver la [tabla 4.1.3](#) del [numeral 4.1](#)):

- Multímetro autoescala (Voltímetro V2) marca Rish Max14.
- Interruptor DC (SW2), 2 polos, 250 V y 30 A.
- Amperímetro (A2), AC y DC, clase 0,5 , tipo hierro móvil, uso en posición horizontal, escalas 6 y 30 A, marca Trub Tauber Zurich, serial 2010-00123.

- Multímetro analógico (Amperímetro A3), tipo bobina móvil con rectificador, AC y DC, resistencia interna de $3333 \Omega/V$, marca Unigor 1p y serial EIE2012.048.
- Carga variable resistiva pura (C1), 4 kW, conexión monofásica y trifásica, marca Label y modelo PC02.
- Reostato marca PHYWE 06114.01, SE/100 Ω – 1,8 A, KB 2,5 A / 15 min, serial UCV 08-23985.
- Conductores aislados flexible mínimo de 7 hilos, de calibre mínimo 8 AWG de cobre.

Para el generador sincrónico (amarillo, banco 3) (valores de placa ver la [tabla 4.1.4](#) del [numeral 4.1](#)):

- Interruptor DC (SW4), 2 polos, 250 V y 30 A.
- Interruptor AC (SW3), 3 polos, 380 V y 25 A.
- Amperímetro (A5), AC y DC, clase 0,5 , tipo hierro móvil, uso en posición horizontal, escalas 0,3 ; 1,2 y 6A, marca Trub Tauber Zurich, serial EIE2012.026.
- Multímetro analógico (Amperímetro A4), tipo bobina móvil con rectificador, AC y DC, resistencia interna de $3333 \Omega/V$, marca Unigor 1s y serial EIE2012.049.

- Carga variable resistiva pura (C2), 4 kW, conexión monofásica y trifásica, marca Label y modelo PC02.
- Carga variable resistiva pura (C3), se estima de 4 kW, conexión trifásica, sistema de cuchillas, marca Westinghouse y style S-B7043.
- Reostato marca PHYWE 06114.01, SE/100Ω – 1,8 A, KB 2,5 A / 15 min, serial UCV 08-23951.
- Multímetro analógico (Voltímetro V3) tipo bobina móvil con rectificador, AC y DC, marca Unigor A41 y serial EIE2012.047.

4.7.4 Datos experimentales y determinaciones

En la tabla 4.7.1 se presentan las mediciones tomadas durante la prueba.

Tabla 4.7.1. *Datos experimentales de la prueba con carga.*

Medición	Carga [%]	I [A]	$\pm\Delta I$ [A]	V [V]	$\pm\Delta V$ [V]	N [rpm]	$\pm\Delta N$ [rpm]	Pc [W] 3Ø	$\pm\Delta Pc$ [W]
1	136,0	34,0	0,4	208	2	1128	2	10400	300
2	124,8	31,2	0,4	208	2	1144	2	9600	300
3	100,8	25,2	0,4	208	2	1150	2	7600	300
4	75,2	18,8	0,4	208	2	1180	2	5300	300
5	52,8	13,2	0,4	208	2	1190	2	2300	300
6	44,8	11,2	0,4	208	2	1194	2	2300	300

Dado a que la medición de resistencia por el método del puente Kelvin ofrece un error muy pequeño y además descarta la resistencia de los conductores requeridos para el instrumento. Se midió las resistencias de fase para la determinación de la

temperatura al momento de culminar la prueba de carga, donde estos datos experimentales se dan a conocer en la tabla 4.7.2.

Tabla 4.7.2. *Datos experimentales de la medición de resistencia para la determinación de la temperatura al final de la prueba con carga.*

Terminales	R(fase)	Rx [Ω]	$\pm\Delta R_x$ [Ω]	Esc. usada
En frio T1=(24,0 \pm 0,1) °C:				
T1 a T10	RA	0,80	0,01	0,1
T2 a T11	RB	0,80	0,01	0,1
T3 a T12	RC	0,80	0,01	0,1
R1 (promedio)		0,80	0,01	
Después del prueba de carga:				
T1 a T10	RA	0,83	0,01	0,1
T2 a T11	RB	0,83	0,01	0,1
T3 a T12	RC	0,83	0,01	0,1
R2 (promedio)		0,83	0,01	

Con los valores promedio de resistencia se determina la temperatura en los devanados de la máquina siendo este el punto de operación para el momento de la prueba, luego aplicando la ecuación (3) del [numeral 3.2.4.4](#), se obtiene la temperatura (T2) que alcanzó la máquina.

$$T2[^\circ\text{C}] = (33,7 \pm 6,7) ^\circ\text{C}$$

A pesar que no es el objetivo que persigue en este momento el estudio, se calcula a la temperatura de alza de la máquina como consecuencia de la prueba de carga y está es la diferencia que hay entre la temperatura ambiente y la temperatura [T2] calculada anteriormente.

$$^\circ\text{C rise (Exp)} = (9,7 \pm 6,8) ^\circ\text{C} < 40,0 ^\circ\text{C}$$

Comprobando así que esta temperatura calculada no excede los 40 °C rise indicados en la placa de la máquina, lo cual implica que la máquina está sobredimensionada ya que no estaba a plena carga.

Además en los Anexos D se presenta una fotografía como evidencia del experimento.

4.8 Prueba en vacío

4.8.1 Diagrama de conexiones

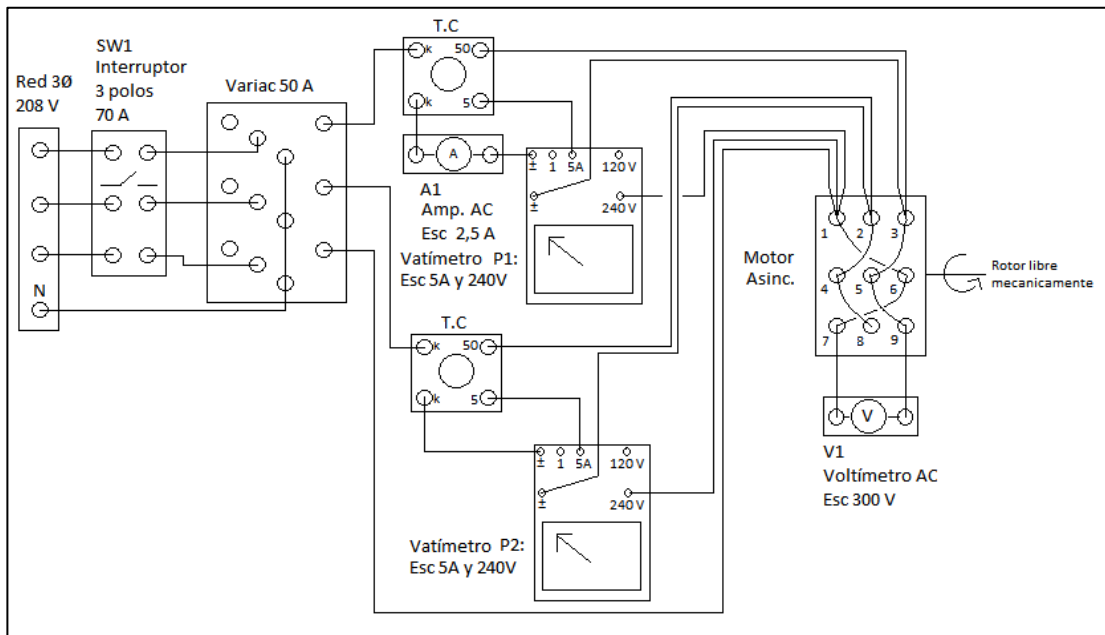


Figura 4.8.1. Diagrama de conexiones para el motor jaula de ardilla (verde, banco 3), prueba sin carga.

4.8.2 Condiciones del ensayo

- La corriente máxima no excederá el 100 % de sus valores nominales ($I_{max} = 25 A$).
- La máquina deberá estar en modo motor en vacío, es decir, el eje de la máquina debe estar libre mecánicamente.
- Antes de comenzar el ensayo los transformadores de corriente debe estar en condición de corto para evitar daños en los equipos si se arranca a tensión nominal.
- Cuando se aplica la tensión al motor, se empieza en el 125 % del valor nominal y se continúa descendiendo hasta llegar al valor más bajo para realizar las mediciones.

4.8.3 Instrumentos y equipos, disponibles en el LME de la EIE-UCV

- Conductores aislados flexible mínimo de 7 hilos, de calibre mínimo 8 AWG de cobre.
- Interruptor automático (SW1) AC, 3 polos, 70 A, 600 V, marca Disjoncteur (se recomienda un interruptor de 50). EIE2012.412.
- Dos vatímetros (P1 y P2) del tipo electrodinámico, marca Yokogama, modelo 2041, AC y DC, uso de posición horizontal, escala en la bobina voltimétrica de 120 y 240 V, escala de bobina amperimétrica de 1 y 5 A, para aplicar método de los dos vatímetros, seriales EIE2012.062 y EIE2012.063.

- Dos transformadores de corriente (T.C), marca Stormwandler, 5 VA, corriente de entrada 5, 10, 25 y 50 A, corriente de salida 5 A, seriales EIE2012.207 y EIE2012.210.
- Amperímetro (A1) tipo electrodinámico, AC – DC, clase 0,2 , uso en posición horizontal, escalas de 5 y 2,5 A, resistencia interna 0,28 y 1,12 Ω , marca Trub Tauber Zurich, serial UCV 08-9047 (para las primeras cinco mediciones).
- Voltímetro (V1) tipo electrodinámico, AC – DC, clase 0,2 , uso en posición horizontal, escalas de 150, 300, 450 y 600 V, resistencia interna 32,93 Ω/V , marca Trub Tauber Zurich, serial UCV 08-9033.
- Variac trifásico, valores por fase: 7 kVA, 50 A, 120 V input, 0 a 140 V out, marca Powerstat y serial EIE2012.446.

4.8.4 Datos experimentales y determinaciones

Donde las mediciones realizadas se dan a conocer en la tabla 4.8.1.

Tabla 4.8.1. *Datos experimentales de la prueba en vacío.*

Medición	Tensión[%]	V [V]	$\pm\Delta V$ [V]	I [A]	$\pm\Delta I$ [A]	Pv [W] 3 \emptyset	$\pm\Delta Pv$ [W]
1	118,27	246	2	16,2	0,2	750	100
2	100,00	208	2	11,8	0,2	400	100
3	79,81	166	2	8,16	0,08	300	40
4	58,65	122	2	5,68	0,08	180	40
5	48,08	100	2	4,64	0,08	140	40
6	33,65	70	2	3,28	0,04	100	20
7	19,23	40	2	2,08	0,04	60	20

Dado a que la medición de resistencia por el método del puente Kelvin ofrece un error muy pequeño y además descarta la resistencia de los conductores requeridos para el instrumento, se midió las resistencias de fase para la determinación de la temperatura al momento de culminar la prueba.

Los datos experimentales de dicha prueba se dan a conocer en la tabla 4.8.2.

Tabla 4.8.2. *Datos experimentales de la medición de resistencia para la determinación de la temperatura al final de la prueba en vacío.*

Terminales	R(fase)	Rx [Ω]	$\pm\Delta R_x$ [Ω]	Esc. usada
En frio (T1=24°C):				
T1 a T10	RA	0,80	0,01	0,1
T2 a T11	RB	0,80	0,01	0,1
T3 a T12	RC	0,80	0,01	0,1
R1 (promedio)		0,80	0,01	
Después del prueba de carga:				
T1 a T10	RA	0,81	0,01	0,1
T2 a T11	RB	0,81	0,01	0,1
T3 a T12	RC	0,81	0,01	0,1
R2 (promedio)		0,81	0,01	

Con los valores promedio de resistencia se determina la temperatura de la máquina en su punto más caliente (devanado en el área del entrehierro) luego de la prueba de vacío y aplicando la ecuación (3) del [numeral 3.2.4.4](#), se obtiene la temperatura (T2) que alcanzó la máquina.

$$T2[^\circ\text{C}] = (27,2 \pm 6,6) ^\circ\text{C}$$

4.9 Prueba de rotor bloqueado

4.9.1 Diagramas de conexiones

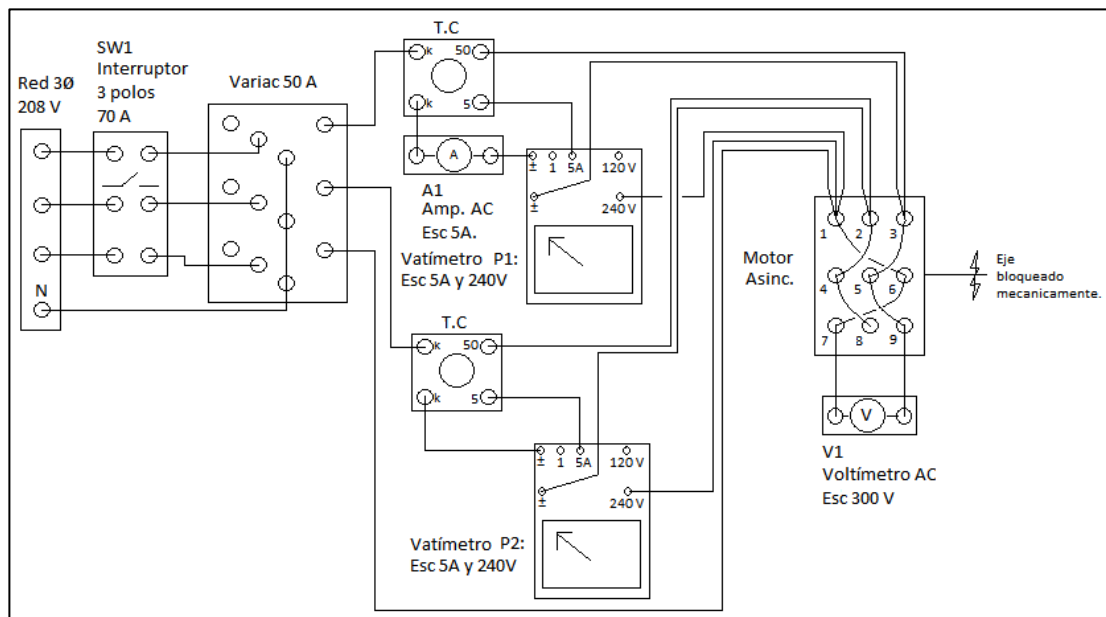


Figura 4.9.1. Diagrama de conexiones para el motor jaula de ardilla, prueba con rotor bloqueado a frecuencia nominal según la norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).

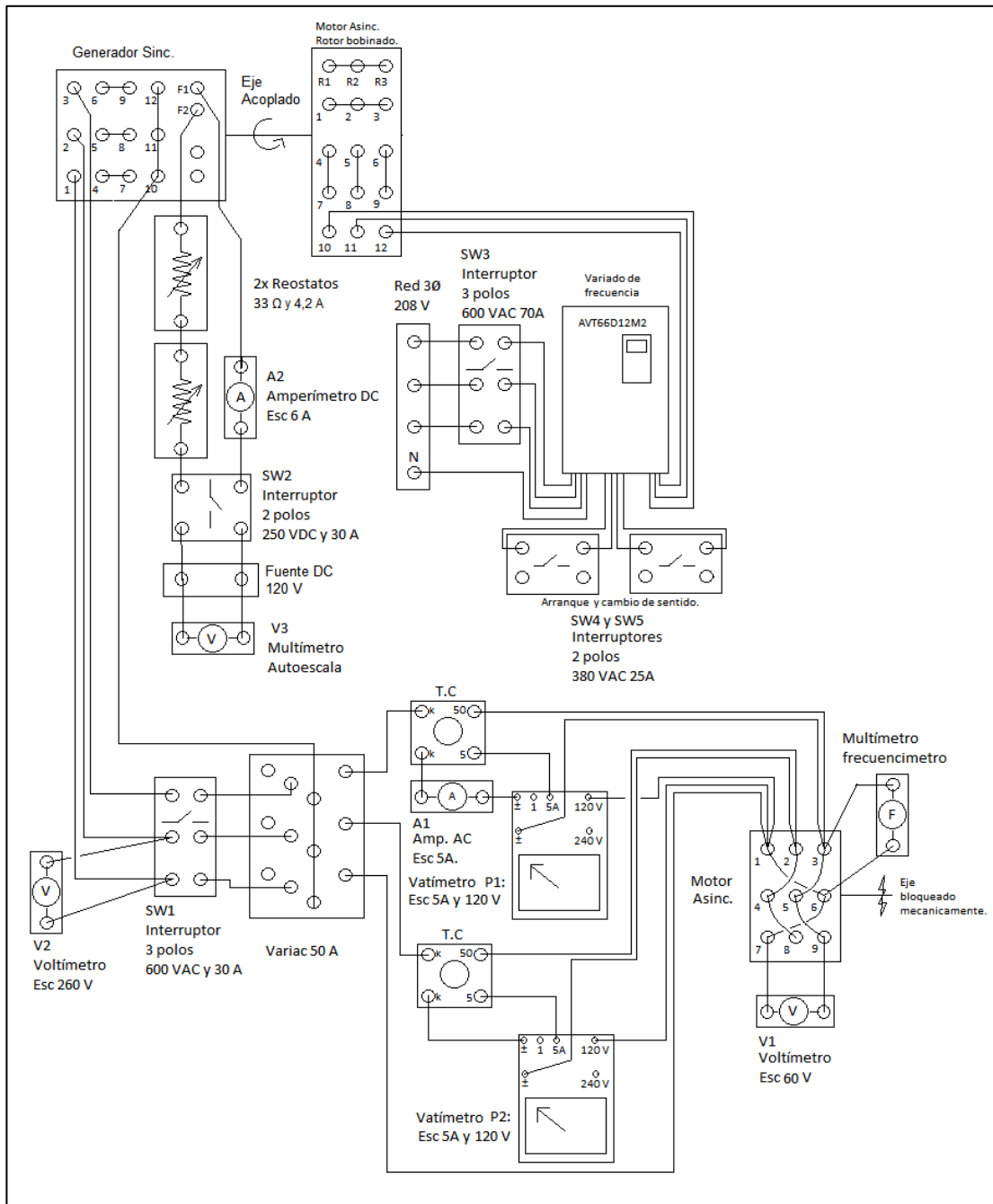


Figura 4.9.2. Diagrama de conexiones para la prueba con rotor bloqueado al 50 y 25 % de la frecuencia nominal según la norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).

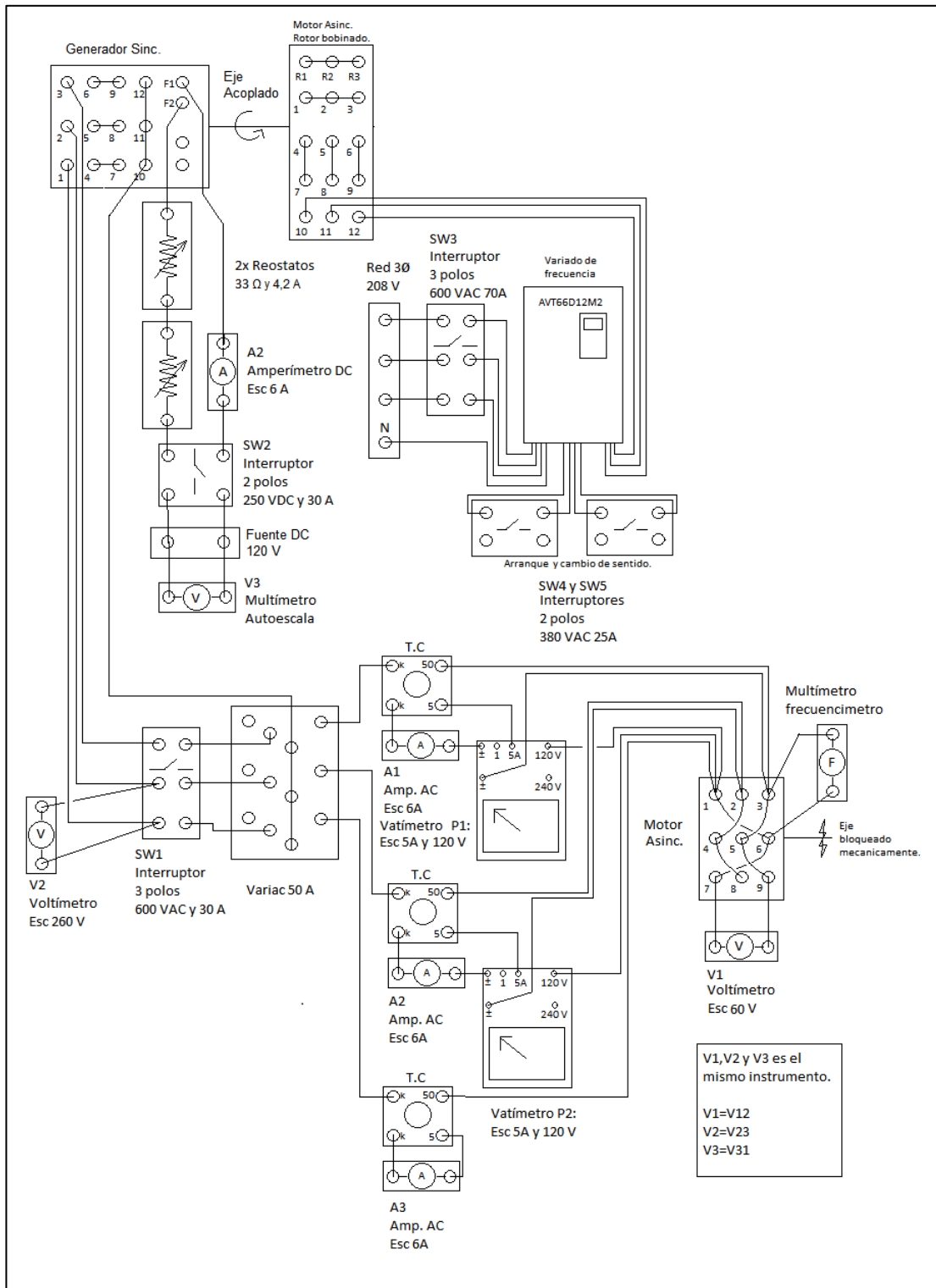


Figura 4.9.3. Diagrama de conexiones para la prueba con rotor bloqueado al 25 % de la frecuencia nominal según la norma IEEE Std 112-2004.

4.9.2 Condiciones del ensayo

- Corriente del ensayo:
 - No excederá el 100 % de su valor nominal según la Norma IEEE Std 112-2004 ($I_{max} = 25 A$).
 - Deberá estar en un rango del 10 al 150 % de sus valor nominal según la Norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008). ($I_{max} = 37,5 A$).
- La máquina deberá estar en modo motor bajo la condición de rotor bloqueado mecánicamente.

4.9.3 Instrumentos y equipos, disponibles en el LME de la EIE-UCV

Para la prueba a frecuencia nominal (60 Hz) según la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008):

- Conductores aislados flexible mínimo de 7 hilos, de calibre mínimo 8 AWG de cobre.
- Interruptor automático (SW1) AC, 3 polos, 70 A, 600 V, marca Disjoncteur (se recomienda un interruptor de 50). EIE2012.412.
- Dos vatímetros (P1 y P2) del tipo electrodinámico, marca Yokogama, modelo 2041, AC y DC, uso de posición horizontal, escala en la bobina voltimétrica de 120 y 240 V, escala de bobina amperimétrica de 1 y 5 A, para aplicar método de los dos vatímetros, seriales EIE2012.062 y EIE2012.063.

- Dos transformadores de corriente (T.C), marca Stormwandler, 5 VA, corriente de entrada 5, 10, 25 y 50 A, corriente de salida 5 A, seriales EIE2012.207 y EIE2012.210.
- Amperímetro (A1) tipo electrodinámico, AC – DC, clase 0,2 , uso en posición horizontal, escalas de 5 y 2,5 A, resistencia interna 0,28 y 1,12 Ω , marca Trub Tauber Zurich, serial UCV 08-9047.
- Voltímetro (V1) tipo electrodinámico, AC – DC, clase 0,2 , uso en posición horizontal, escalas de 150, 300, 450 y 600 V, resistencia interna 32,93 Ω/V , marca Trub Tauber Zurich, serial UCV 08-9033 (para la primera medición en la prueba R.B según la IEC a 30 Hz).
- Variac trifásico, valores por fase: 7 kVA, 50 A, 120 V input, 0 a 140 V out, marca Powerstat y serial EIE2012.446.

Para la prueba al 50 y 25 % de la frecuencia nominal (30 y 15 Hz) según la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008):

Las máquinas involucradas del banco 3 son: El motor jaula de ardilla (verde) como máquina de estudio (para valores de placa ver la [tabla 4.1.6](#)), el generador asincrónico de rotor bobinado (rojo) (valores de placa ver la [tabla 4.1.5](#)) y el generador sincrónico (amarillo) (valores de placa ver la [tabla 4.1.4](#)), (Valores de placa del [numeral 4.1](#)).

- Conductores aislados flexible mínimo de 7 hilos, de calibre mínimo 8 AWG de cobre.

- Interruptor automático (SW1), 3 polos, 30 A, 600 V_{ac} y 250 V_{dc}, marca Cutler Hammary modelo HDF 65K.
- Dos vatímetros (P1 y P2) del tipo electrodinámico, marca Yokogama, modelo 2041, AC y DC, uso de posición horizontal, escala en la bobina voltimétrica de 120 y 240 V, escala de bobina amperimétrica de 1 y 5 A, para aplicar método de los dos vatímetros, seriales EIE2012.062 y EIE2012.063.
- Dos transformadores de corriente (T.C), marca Stormwandler, 5 VA, corriente de entrada 5, 10, 25 y 50 A, corriente de salida 5 A, seriales EIE2012.207 y EIE2012.210.
- Amperímetro (A1) tipo electrodinámico, AC – DC, clase 0,2 , uso en posición horizontal, escalas de 5 y 2,5 A, resistencia interna 0,28 y 1,12 Ω , marca Trub Tauber Zurich, serial UCV 08-9047.
- Voltímetro (V1) del tipo hierro móvil, AC y DC, clase 0,5 , uso en posición horizontal, escalas de 30 y 60 V, marca Trub Tauber Zurich y serial EIE2012.035 (para las primeras nueve mediciones).
- Multímetro analógico (Voltímetro V1), tipo bobina móvil con rectificador, AC y DC, resistencia interna de 3333 Ω/V , marca Unigor 1p y serial EIE2012.048 (para la última medición).
- Dos reostato de 33 Ω y 4,2 A.
- Variac trifásico, valores por fase: 7 kVA, 50 A, 120 V input, 0 a 140 V out, marca Powerstat y serial EIE2012.446.

- Multímetro digital (frecuencímetro), error de $\pm 0,01$ Hz, marca Fluke 175 True rms multimeter.
- Amperímetro (A2) del tipo hierro móvil, AC y DC, clase 0,5 , uso en posición horizontal, escalas de 6; 1,2 y 0,3 A, marca Trub Tauber Zurich y serial EIE2012.026.
- Interruptor (SW2) DC, 2 polos, 250 V y 30 A.
- Voltímetro (V2) del tipo hierro móvil, marca Trub Tauber Zurich, clase 0,5 , AC y DC, uso en posición horizontal, escala 130, 260 y 520 V
- Multímetro (V3) auto escala, marca fluke 75 True rms multimeter.
- Interruptor (SW3) automático AC, 3 polos, 70 A, 600 V, marca Disioncteur (se recomienda un interruptor de 50). EIE2012.412.
- Interruptores (SW4 y SW5) automáticos, 2 polos, 380 Vac y 25 A.
- Variador de frecuencia AVT66D12M2, valores de entrada: 208 V, 45 A y 60 Hz, valeres de salida. 208 V, de 0 a 45 A, de 0 a 60 Hz.

Para la prueba a 25 % de la frecuencia nominal según la IEEE Std 112-2004:

- Dos reostato de 33Ω y 4,2 A.
- Conductores aislados flexible mínimo de 7 hilos, de calibre mínimo 8 AWG de cobre.

- Interruptor automático (SW1), 3 polos, 30 A, 600 V_{ac} y 250 V_{dc}, marca Cutler Hammary modelo HDF 65K.
- Dos vatímetros (P1 y P2) del tipo electrodinámico, marca Yokogama, modelo 2041, AC y DC, uso de posición horizontal, escala en la bobina voltimétrica de 120 y 240 V, escala de bobina amperimétrica de 1 y 5 A, para aplicar método de los dos vatímetros, seriales EIE2012.062 y EIE2012.063.
- Tres transformadores de corriente (T.C), marca Stormwandler, 5 VA, corriente de entrada 5, 10, 25 y 50 A, corriente de salida 5 A, seriales EIE2012.207, EIE2012.210 y EIE21012.206.
- Tres amperímetros (A1, A2 y A3) tipo hierro móvil, AC y DC, clase 0,5 , uso en posición horizontal, escalas de 6 y 1,2 A, marca Goerz Electro, serial EIE2012.180, EIE2012.181 y EIE2012.177.
- Voltímetro (V1=V2=V3) del tipo hierro móvil, AC y DC, clase 0,5 , uso en posición horizontal, escalas de 30 y 60 V, marca Trub Tauber Zurich y serial EIE2012.035.
- Variac trifásico, valores por fase: 7 kVA, 50 A, 120 V input, 0 a 140 V out, marca Powerstat y serial EIE2012.446.
- Multímetro digital (frecuencímetro), error de $\pm 0,01$ Hz, marca Fluke 175 True rms multimeter.
- Interruptor (SW2) DC, 2 polos, 250 V y 30 A.
- Multímetro (V3) auto escala, marca fluke 75 True rms multimeter.

- Voltímetro (V4) del tipo hierro móvil, marca Trub Tauber Zurich, clase 0,5 , AC y DC, uso en posición horizontal, escala 130, 260 y 520 V
- Interruptor (SW3) automático AC, 3 polos, 70 A, 600 V, marca Disioncteur (se recomienda un interruptor de 50). EIE2012.412.
- Interruptores (SW4 y SW5) automáticos, 2 polos, 380 Vac y 25 A.
- Variador de frecuencia AVT66D12M2, valores de entrada: 208 V, 45 A y 60 Hz, valores de salida. 208 V, 45 A, de 0 a 60 Hz.

4.9.4 Datos experimentales y determinaciones

Las mediciones observadas en cada experimento según la frecuencia se presentan en las tablas 4.9.1 a la 4.9.4.

Tabla 4.9.1. *Datos experimentales de la prueba de rotor bloqueado según la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) a frecuencia nominal.*

Medición	Carga [%]	I [A]	$\pm\Delta I$ [A]	V [V]	$\pm\Delta V$ [V]	Prb [W] 3Ø	$\pm\Delta Prb$ [V]
1	144,00	36,0	0,4	65	1	2100	100
2	121,60	30,4	0,4	56	1	1650	100
3	100,80	25,2	0,4	47	1	1150	100
4	78,40	19,6	0,4	37	1	700	100
5	72,00	18,0	0,4	34	1	600	100
6	60,80	15,2	0,4	29	1	450	100
7	52,80	13,2	0,4	26	1	350	100
8	38,40	9,60	0,08	18,0	0,5	160	20
9	21,12	5,28	0,08	10,0	0,5	60	20
10	9,60	2,40	0,08	4,5	0,5	20	20

Tabla 4.9.2. Datos experimentales de la prueba de rotor bloqueado por la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) al 50 % de la frecuencia nominal.

Medición	Carga [%]	I [A]	$\pm\Delta I$ [A]	V [V]	$\pm\Delta V$ [V]	Prb [W] 3 ϕ	$\pm\Delta Prb$ [V]
1	84,80	21,2	0,4	24,5	0,5	650	100
2	65,60	16,4	0,4	19,0	0,5	400	100
3	57,60	14,4	0,4	17,5	0,5	350	100
4	54,40	13,6	0,4	15,5	0,5	300	100
5	19,60	4,9	0,1	11,5	0,5	175	50
6	16,80	4,2	0,1	10,5	0,5	125	50
7	10,40	2,6	0,1	9,0	0,5	75	50
8	10,00	2,5	0,1	6,5	0,5	75	50
9	9,60	2,4	0,1	5,5	0,5	50	50
10	8,00	2,0	0,1	4,5	0,5	50	50

Tabla 4.9.3. Datos experimentales de la prueba de rotor bloqueado por la IEC 60034-28(NTC 5642, 2008) al 25 % de la frecuencia nominal.

Medición	Carga [%]	I [A]	$\pm\Delta I$ [A]	V [V]	$\pm\Delta V$ [V]	Prb [W] 3 ϕ	$\pm\Delta Prb$ [V]
1	58,40	14,6	0,2	14,0	0,5	350	50
2	52,80	13,2	0,2	11,5	0,5	250	50
3	44,80	11,2	0,2	9,5	0,5	200	50
4	38,40	9,6	0,2	8,5	0,5	125	50
5	33,60	8,4	0,2	7,5	0,5	125	50
6	30,40	7,6	0,2	6,0	0,5	75	50
7	22,40	5,6	0,2	4,5	0,5	50	50
8	12,40	3,1	0,1	3,5	0,5	75	50
9	9,60	2,40	0,04	2,5	0,5	10	10
10	7,36	1,84	0,04	1,95	0,05	10	10

Tabla 4.9.4. Datos experimentales de la prueba de rotor bloqueado al 25 % de la frecuencia nominal, según la IEEE Std 112 – 2004.

Medición	Carga [%]	I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]	$\pm\Delta I$ 1,2,3 [A]	I promedio [A]	v1 [V]	v2 [V]	v3 [V]	$\pm\Delta V$ 1,2,3 [V]	V promedio [V]	Prb [W] 3 ϕ	$\pm\Delta Prb$ [V]
1	72	18	19	19	1	19	17,0	16,5	17,0	0,5	16,8	400	100
2	64	16	17	17	1	17	15,0	15,5	15,0	0,5	15,2	300	100
3	60	15	15	15	1	15	13,5	14,0	13,5	0,5	13,7	250	100
4	52	13	14	13	1	13	11,5	12,5	12,0	0,5	12,0	200	100

Además en los Anexos D se presenta una fotografía como evidencia del experimento a frecuencia reducida.

4.10 Determinación del circuito equivalente según la Norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008)

Este método se basa en un proceso de interpolación en función de la medición de la temperatura o de la resistencia, de la pruebas de carga, vacío y rotor bloqueado.

Donde los primeros resultados se obtienen en función de encontrar las pérdidas constantes directamente proporcional a una tensión del estator al cuadrado con los datos de la prueba de vacío y que se muestra en la tabla 4.10.1.

Tabla 4.10.1. *Resultados iniciales para la determinación del circuito equivalente en función de la prueba de vacío.*

Medición	Tensión[%]	Us [V]	Is [A]	Pv [W] 3Ø	Pk [W]	Us² [V²]
1	118,27	246	9,35	750	538,24	60516
2	100,00	208	6,81	400	299,32	43264
3	79,81	166	4,71	300	251,85	27556
4	58,65	122	3,28	180	156,67	14884
5	48,08	100	2,68	140	124,43	10000
6	33,65	70	1,89	100	91,47	4900
7	19,23	40	1,20	60	56,54	1600

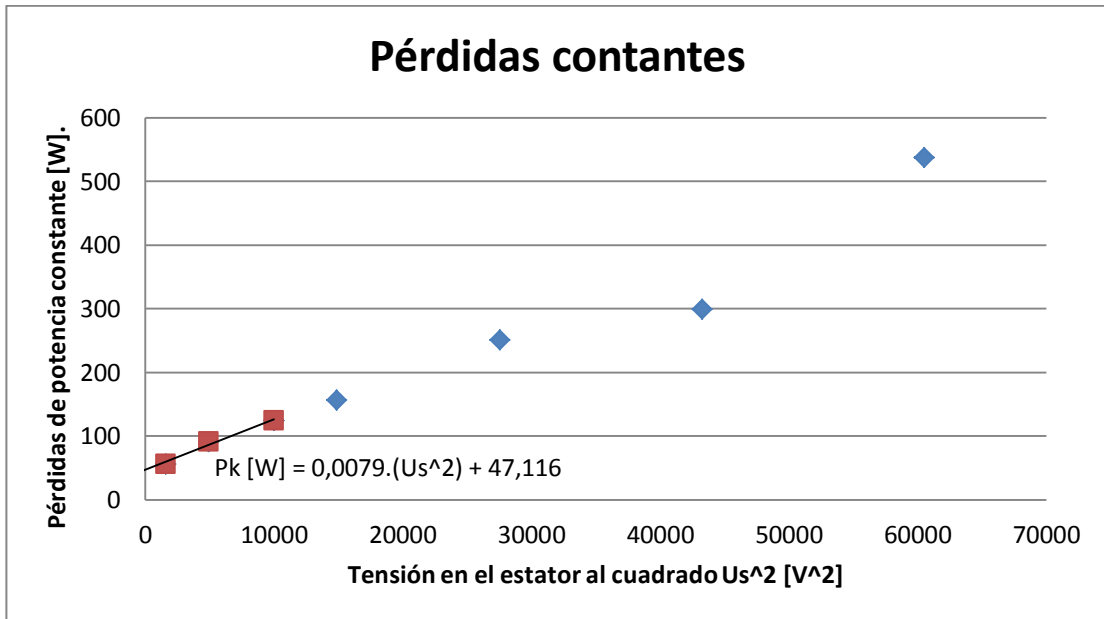


Figura 4.10.1. Determinación de las pérdidas constantes en función de la tensión de fase en el estator.

Donde por medio de la figura 4.10.1 se obtiene las pérdidas constante (fricción y ventilación), las pérdidas en el núcleo y además su resistencia, donde los resultados se muestran en la tabla 4.10.2.

Tabla 4.10.2. Resultados en función de las pérdidas constantes.

P_{fw} [W] 3Ø= 47,116
P_{fe} [W] 3Ø= 252,203
R'fe [Ω]= 514,634

Y luego se obtiene los resultados aun en función de prueba de vacío encontrando la reactancia total del estator, donde esta norma la define como la suma de la reactancia del estator con la reactancia magnetizante, que se muestra en la tabla 4.10.3.

Tabla 4.10.3. Resultados en función de la prueba de vacío para determinar la reactancia total del estator.

Medición	Tensión [%]	U [V]	I [A]	Pv [W] 3Ø	Z s=0 [Ω]	Cos φ	R s=0 [Ω]	Xts [Ω]	Lts [H]	Im [A]
1	118,27	246	16,20	750	26,30151	0,10866	2,85780	26,14579	0,06935	9,35307
2	100,00	208	11,80	400	30,53107	0,09409	2,87274	30,39561	0,08063	6,81273
3	79,81	166	8,16	300	35,23535	0,12787	4,50548	34,94611	0,09270	4,71118
4	58,65	122	5,68	180	37,20250	0,14997	5,57925	36,78176	0,09757	3,27935
5	48,08	100	4,64	140	37,32868	0,17420	6,50268	36,75793	0,09750	2,67891
6	33,65	70	3,28	100	36,96450	0,25146	9,29506	35,77675	0,09490	1,89371
7	19,23	40	2,08	60	33,30867	0,41636	13,86834	30,28426	0,08033	1,20089

Ahora con los datos de la prueba de rotor bloqueado a frecuencia nominal se calcula la inductancia de dispersión total del estator, corregida **por cálculo**, donde esta corrección se realiza según el [numeral 3.6.2.1](#) y cuyos resultados se muestran en la tabla 4.10.4.

Tabla 4.10.4. Resultados de la inductancia de dispersión total de estator corregida.

Medición	Carga [%]	U [V]	I [A]	Prb [W] 3Ø	Z s=1 [Ω]	Cos φrb	R s=1 [Ω]	Xsa [Ω]	Lsa [H]	Lσ [H]
1	144,00	65	36,00	2100	3,12731	0,51813	1,62037	2,67479	0,00710	0,01044
2	121,60	56	30,40	1650	3,19062	0,55958	1,78541	2,64431	0,00701	0,01032
3	100,80	47	25,20	1150	3,23041	0,56058	1,81091	2,67510	0,00710	0,01044
4	78,40	37	19,60	700	3,26969	0,55729	1,82216	2,71488	0,00720	0,01060
5	72,00	34	18,00	600	3,27165	0,56603	1,85185	2,69710	0,00715	0,01053
6	60,80	29	15,20	450	3,30457	0,58940	1,94771	2,66957	0,00708	0,01042
7	52,80	26	13,20	350	3,41162	0,58879	2,00872	2,75756	0,00731	0,01076
8	38,40	18	9,60	160	3,24760	0,53458	1,73611	2,74459	0,00728	0,01071
9	21,12	10	5,28	60	3,28040	0,65608	2,15220	2,47569	0,00657	0,00966

Donde con los resultados finales de la tabla 4.10.3 y 4.10.4, se presenta la inductancia total del estator y la inductancia de dispersión total del estator corregido, y en función de la corriente del estator se obtiene la figura 4.10.2. Grafica 1, la cual

se observa las curvas de comportamiento de cada inductancia mencionada anteriormente.

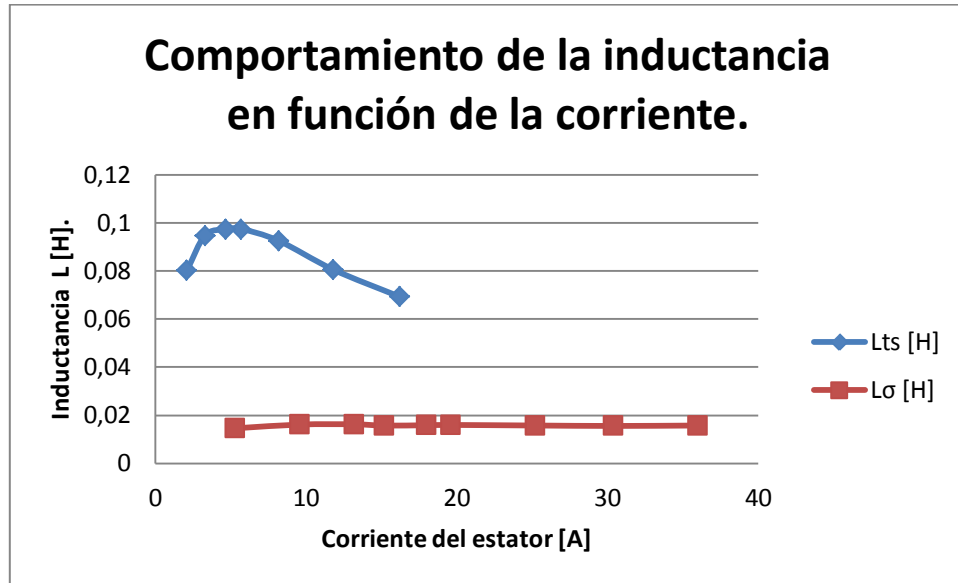


Figura 4.10.2. Gráfica 1. Comportamiento de la inductancia en función de la corriente.

Y en función de la figura 4.10.2, se presenta el valor de la inductancia de dispersión total corregida, la inductancia magnetizante, la inductancia de estator y la del rotor referida al estator, para la corriente nominal del estator, estos valores se indican en la tabla 4.10.5.

Tabla 4.10.5. Resultados en función de la inductancia de dispersión sin corrección.

L_{σ} [H]=	0,00625
L_m [H]=	0,07644
U_m [V]=	196,31906
L_s [H]=	0,00419
L'_r [H]=	0,00625

Ahora por medio de los datos de la prueba de carga para un valor de tensión nominal se obtiene el restante de los parámetros indicados en la tabla 4.10.6.

Tabla 4.10.6. *Resultados de resistencia del rotor referida al estator, reactancia magnetizante y del estator.*

S=	0,04167
cos φ=	0,83712
Z[Ω]=	14,29629
X[Ω]=	7,82029
X´r[Ω]=	2,35690
Xs[Ω]=	1,57912
Xm[Ω]=	28,81649
R´r 25º[Ω]=	0,53313

Ahora con fines prácticos se muestra en la tabla 4.10.7 los valores de los parámetros del circuito equivalente según la norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).

Tabla 4.10.7. *Valores de los parámetros del circuito equivalente según la Norma IEC 60034-28 (NTC 5246,2008).*

Rs [Ω]=	0,80
Xs [Ω]=	1,57912
R´fe [Ω]=	514,63
Xm [Ω]=	28,81649
R´r 25 [Ω]=	0,53313
X´r [Ω]=	2,35690

4.11 Determinación del circuito equivalente según la Norma IEEE Std 112-2004, Método 1

Este método se basa en un proceso de iterativo en función de la medición de la temperatura o de la resistencia, de las pruebas de vacío y rotor bloqueado a una frecuencia del 25 % de la nominal.

Dado a exigencia del método las corrientes y tensiones se expresan en fase y la potencia en monofásicas.

Conocidos los valores de placa de la máquina de estudio (motor jaula de ardilla, [tabla 4.1.6](#) del [numeral 4.1](#)) se compara con la información según la versión condensada de la *NEMA Motor-Generator Standards for Three-Phase Inductor Motors 1999* (p. 55) en la Tabla VII. General Purpose Design B Motor Full Load Current (National Electrical Code 1996 (NEC) Table 430 – 150) la cual confirma que la máquina es NEMA B, lo que indica que la relación de reactancias es igual a 0,67.

Ahora se presentan los resultados iniciales para la metodología del circuito equivalente según la norma IEEE Std 112-2004, Método 1 detallados en el [numeral 3.6.2.2](#) para la máquina jaula de ardilla, en la tabla 4.11.1.

Tabla 4.11.1. *Resultados iniciales para la determinación del circuito equivalente según la Norma IEEE Std 112-2004, Método 1.*

X1/X2=	0,67
Q10 [VAR]=	1410,762
Q1rb [VAR]=	228,862
X1(0) [Ω]=	0,658
XM(0) [Ω]=	31,123
X1,rb,(0) [Ω]=	0,449

A partir de estos valores se determinó los valores nuevos por medio de un proceso iterativo, cuyos resultados se encuentran dados en la tabla 4.11.2.

Tabla 4.11.2. *Resultados del proceso iterativos para la determinación del circuito equivalente según la Norma IEEE Std 112-2004, Método 1.*

Iterac.	X1 [Ω]	XM [Ω]	X1rb [Ω]	Error X1[Ω]	Error XM [Ω]
0	0,658	31,123	0,449	-	-
1	1,796	30,061	0,463	1,138	1,061
2	1,854	29,022	0,465	0,058	1,040
3	1,860	28,855	0,465	0,006	0,167
4	1,861	28,830	0,465	0,001	0,025
5	1,861	28,826	0,465	0,000	0,004
6	1,861	28,825	0,465	0,000	0,001

Según los valores finales del proceso iterativo se presenta las reactancias restantes en la tablas 4.11.3.

Tabla 4.11.3. *Resultados de las reactancias con previo cumplimiento de las condiciones de error.*

X1 [Ω]=	1,861
XM [Ω]=	28,825
X1rb [Ω]=	0,465
X2 [Ω]=	2,777

Ahora con los datos en la prueba de vacío se determinó para cada medición la tensión inducida al cuadrado mostrada en la tabla 4.11.4.

Tabla 4.11.4. *Resultados para el calculo de la fuerza electromotriz inducida a partir de la prueba de vacío.*

Medición	I10[A] (fase)	V10[V](fase)	Pv [W] 1Ø	E0 [V]	E0^2 [V^2]
1	9,35	246	250	37,568	1411,375
2	6,81	208	133	66,209	4383,643
3	4,71	166	100	94,719	8971,688
4	3,28	122	60	115,574	13357,429
5	2,68	100	47	156,824	24593,845
6	1,89	70	33	194,867	37973,138
7	1,20	40	20	227,886	51932,114

Donde al graficar (ver figura 4.11.1) la potencia de la prueba en vacío vs la tensión inducida al cuadrado e interpolando linealmente a un nivel nulo de tensión, la potencia encontrada representa las pérdidas mecánicas en la máquina. Para encontrar un buen valor de las pérdidas mecánicas se tomaron los puntos de menor potencia y que represente a su vez un comportamiento lo más parecido a un sistema lineal.

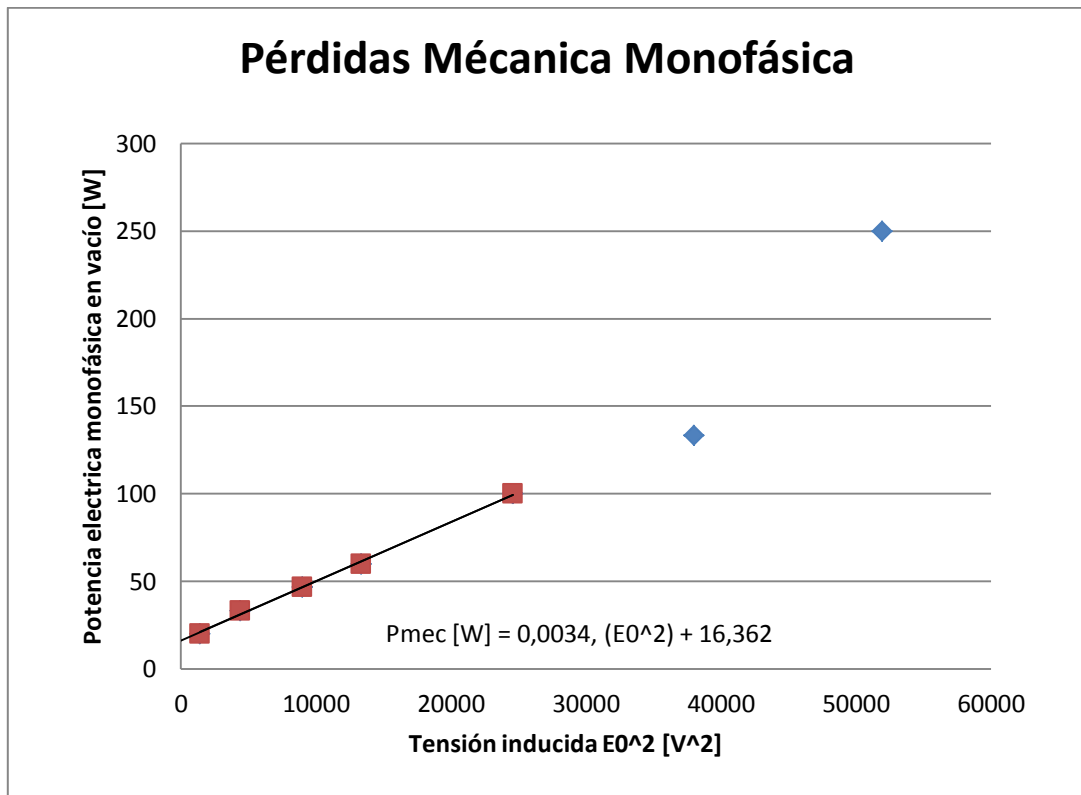


Figura 4.11.1. Determinación de pérdidas mecánicas en función de tensión inducida.

Y en adelante se representa los resultados finales del método, en la tabla 4.11.5

Tabla 4.11.5. Resultados finales del método del circuito equivalente según la IEEE Std 112-2004, Método 1.

Pmec [W]=	16,362
Pfe [W]=	79,841
Gfe [S]=	0,002
R'fe [Ω]=	478,152
R2 [Ω]=	0,384

Ahora con fines prácticos se muestra la tabla 4.11.6 con los valores de los parámetros del circuito equivalente según la norma IEEE Std 112-2004.

Tabla 4.11.6. *Valores de los parámetros del circuito equivalente según la Norma IEEE Std 112-2004, Método 1.*

R1 [Ω]=	0,80
X1 [Ω]=	1,861
R'fe [Ω]=	478,15
XM [Ω]=	28,825
R2 [Ω]=	0,384
X2 [Ω]=	2,778

4.12 Determinación del Par inducido en la máquina jaula de ardilla en función de los parámetros del circuito equivalente

4.12.1 Datos requeridos para la determinación

- Valores de placa dada en [la tabla 4.1.6](#) del [numeral 4.1](#).
- Datos experimentales de la prueba de carga, [tabla 4.7.1](#) del [numeral 4.7.4](#).
- Parámetro del circuito equivalente, [tabla 4.10.7](#) (IEC) y [4.11.6](#) (IEEE) de los numerales [4.10](#) y [4.11](#) respectivamente.

4.12.2 Metodología

Con los valores de la prueba de carga se puede determinar la tensión inducida en cada medición según la ecuación (62).

$$E_0 = \left| (V_1 \angle 0^\circ) - \left(I_1 \angle -\text{Arc cos} \left(\frac{P_1}{V_1 \cdot I_1} \right) \right) \cdot (R_1 + jX_1) \right|$$

Ec. 62

Se calcula las pérdidas monofásicas en el hierro o núcleo por medio la ecuación (63).

$$p_{fe} = \frac{E_0^2}{R_{fe}}$$

Ec. 63

Se determina las pérdidas monofásicas en el cobre del estator según la ecuación (64).

$$p_{cu,1} = I_1^2 \cdot R_1$$

Ec. 64

Determine la potencia en el entrehierro monofásica por la ecuación (65).

$$P_{ag} = P_1 - p_{cu,1} - p_{fe}$$

Ec. 65

Por último el cálculo del par inducido del motor jaula de ardilla según la ecuación (66).

$$T = \frac{3 \cdot P_{ag}}{N_{sinc} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}}$$

Ec. 66

Donde:

E_0 : Tensión de fase inducida en la máquina [V].

I_1 : Corriente de fase en el estator [A].

n_{sinc} : Velocidad nominal de la máquina [rpm].

P_1 : Potencia monofásica de entrada del motor [W].

P_{ag} : Potencia en el entrehierro de la máquina [W].

p_{fe} : Pérdida monofásica en el núcleo [W].

$p_{cu,1}$: Pérdida mecánica monofásica [W].

R_1 : Resistencia de fase del estator [Ω].

R_{fe} : Resistencia de fase del núcleo [W].

T : Par inducido de la máquina [N.m].

V_1 : Tensión de fase en el estator [A].

X_1 : Reactancia de fase del estator [Ω].

4.12.3 Datos experimentales y determinaciones

Dado a que se tiene los parámetros del circuito equivalente por dos normas distintas se expresará los resultados en función de cada una, como se indica en la tabla 4.12.1 y 4.12.2.

Tabla 4.12.1. *Resultados del par inducido y otros valores en función del circuito equivalente según la Norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).*

Medición	I[A] fase	V [V]	Pc [W] 1Ø	Eo [V]	pfe [W]	pcu1 [W]	Pen [W]	T [N.m]
1	19,63	208	3467	185,17484	66,63	308,26667	3091,77060	73,81059
2	18,01	208	3200	187,07820	68,01	259,58400	2872,40984	68,57373
3	14,55	208	2533	190,73220	70,69	169,34400	2293,30064	54,74852
4	10,85	208	1767	194,61175	73,59	94,25067	1598,82240	38,16907
5	7,62	208	767	198,38148	76,47	46,46400	643,73036	15,36793
6	6,47	208	767	199,74450	77,53	33,45067	655,68925	15,65343

Tabla 4.12.2. *Resultados del par inducido y otros valores en función del circuito equivalente según la Norma IEEE Std 112-2004.*

Medición	I[A] fase	V [V]	Pc [W] 1Ø	Eo [V]	pfe [W]	pcu1 [W]	Pen [W]	T [N.m]
1	19,63	208	3467	185,691	72,113	308,267	3086,287	73,680
2	18,01	208	3200	187,517	73,539	259,584	2866,877	68,442
3	14,55	208	2533	190,994	76,291	169,344	2287,698	54,615
4	10,85	208	1767	194,725	79,301	94,251	1593,115	38,033
5	7,62	208	767	198,387	82,311	46,464	637,891	15,229
6	6,47	208	767	199,755	83,451	33,451	649,765	15,512

Dado a que los resultados no difieren más allá de la unidad no se presenta grafica alguna.

4.13 Observación, análisis y comparación de las pruebas y determinaciones

4.13.1 En la medición de resistencia del estator

4.13.1.1 Observaciones

- La Norma IEEE Std 118-1978 trata de forma específica cada método de medición de resistencia, mientras la norma IEC 60034-1 (NTC 2805, 2005) de manera muy básica o generalizada.
- La norma IEEE Std 118-1978 presenta una tabla (Table 1- Applications of Resistance Measuring Methods), (p. 2) indicada para el estudio como tipo resumen en la tabla 3.2.1.

4.13.1.2 Comparación

Para iniciar se presenta la tabla 4.13.1 con los valor de resistencia estática sin corrección por temperatura y sus respectivos errores.

Tabla 4.13.1. *Resultados de los distintos métodos de medición de resistencia del estator sin corrección por temperatura.*

Método	R1 [Ω]	$\Delta R1$ [Ω]
Amperímetro – Voltímetro.	0,77	0,06
Amperímetro.	0,89	0,07
Puente Thomson-Kelvin.	0,80	0,01
Puente Wheatstone.	0,80	0,01

Para observaciones más en detalles se presenta una comparación en la tabla 4.13.2, la cual también muestra una valoración en base de puntos del 0 al 3, entendiéndose como la mejor puntuación de 3 puntos y la peor como 0 puntos, para así visualizar fácilmente del mejor método en comparación a los aplicados en el estudio.

Tabla 4.13.2. Aspectos y valoraciones otorgadas a cada método de medición de resistencia aplicada a la máquina de estudio.

Aspectos	Métodos y valoración en puntos.							
	Amperímetro-Voltímetro.	Ptos.	Amperímetro.	Ptos.	Puente de Thomson-Kelvin.	Ptos.	Puente de Wheatstone.	Ptos.
Factible de realizar en el LME.	Si.	3	Si.	3	Si.	3	Si.	3
Nº de elementos*.	5	1	4	2	1	3	1	3
Nº de mediciones.	Mínimo 10	0	Mínimo 10	0	Basta con 1	3	Basta con 1	3
Dependencia del tiempo.	Si.	0	Si.	0	No.	3	No.	3
Medición directa*2.	No.	0	No.	0	Si.	3	Si.	3
Incluye la resistencia de los conductores.	Si.	0	Si.	0	No.	3	Si.	0
Nº de conductores.	9	0	8	1	4	2	2	3
Error de medición en comparación con otros métodos.	Medio.	2	Alto.	0	Bajo.*3	3	Bajo*3	3
Dificultad.	Medio alto.	0	Medio bajo.	1	Fácil.	2	Muy fácil.	3
Puntos totales :		6		7		25		24

* Entre instrumento y equipos.

*2 Requiere de un cálculo previo.

*3 Errores exactamente iguales.

Dada la información mostrada en la tabla anterior y sus respectivas valoraciones el mejor método de medición de resistencia es el método del puente de Thomson–Kelvin seguido del puente de Wheatstone, notando una leve diferencia en la ponderación entre ellas, y observando que en dicha tabla, se pone en evidencia que los métodos en función de puente, resultan más eficientes debido a la forma práctica y breve de su aplicación además de obtener directamente el valor de resistencia con un error mínimo, sin tener que contar con algún valor y/o cálculo previo.

4.13.2 En la prueba de carga

4.13.2.1 Observaciones y/o comparación

- El ensayo con carga presentado en las normas IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008), IEC 61972 (NTC 5293, 2004) y la IEEE Std 112-2004 son metodológicamente iguales pero en ésta última presenta varios medios de carga para la máquina de estudio las cuales solo uno de ellos es aplicables en el LME y lo definido como carga directa.
- A pesar que la Norma IEC enuncia esta prueba en dos normas distintas, la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) exige hacer la prueba a un máximo del 100 % de la carga nominal mientras la norma IEC 61972 (NTC 5293, 2004) indica un máximo del 150 % de la carga nominal. Dado que esta última presenta una metodología de mejor comprensión que incluso la IEEE Std 112-2004, se tomó dicha norma como referencia para el estudio.
- A pesar de las diferencia entre normas debido la carga máxima para la prueba solo es requerida la medición a carga nominal para el circuito equivalente según la norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).
- Esta prueba no es necesaria para la determinación del circuito equivalente según la Norma IEEE Std 112-2004.
- Dado a que la máquina de estudio (motor jaula de ardilla), es de potencia superior en comparación a las demás máquinas del banco 3, en un número de veces máximo de 1,86 , fue necesario de realizar la carga del motor por el accionamiento de dos generadores (un generador DC tabla 4.1.3 y otro

generador sincrónico tabla 4.1.4) a pesar de esta forma de carga se tuvo que exceder las corrientes la corriente nominal que entrega el generador sincrónico por pocos segundos y aun así solo se alcanzó una carga del 136 % donde lo requerido es del 150 %.

- Para logra la carga del 150 % en la máquina de estudio (jaula de ardilla) se requiere las máquinas restantes del banco 3, accionadas en modo generador. Ésta forma de carga requiere la supervisión de muchos instrumentos lo cual incrementa el grado de dificultad en lo que respecta al manejo y control del experimento, además aumentando los riesgos de accidente por error humano dado a que se requiere un cableado y equipo excesivo para la prueba.

4.13.3 En la prueba de vacío

4.13.3.1 Observaciones y/o comparación.

- La Norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) y la IEC 61972 (NTC 5293, 2004) indican que esta prueba debe realizarse inmediatamente después del ensayo con carga detalle no mencionado en la IEEE Std 112-2004.
- La IEC 60034-28 (NTC 5246, 2008) y la IEC 61972 (NTC 5293, 2004) indican claramente como se tomarán los punto de medición, detalle omitido por la norma IEEE Std 112-2004.
- Dado a que la Norma IEC presenta dos normativas donde se desarrolla la prueba sin carga como la IEC 60034-28(NTC 5642, 2008) y la IEC 61972

(NTC 5293, 2004) se tomo como referencia esta última ya que indica con mayor detalle la metodología de la misma.

4.13.4 En la prueba de rotor bloqueado

4.13.4.1 Observaciones y/o comparación

- La IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) es la única norma que indica cuales son los requisitos respecto a características de potencia y tamaño constructivo mínimos de la máquina para la aplicación de la prueba.
- La prueba se presenta igual en la Norma IEEE Std 112-2004 y en la IEC 60034-2-1 (NTC 3477, 2008) y dirigidas a la determinación de la eficiencia, pero distintas a la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) que se encuentra orientada a la determinación del circuito equivalente. Aunque en el desarrollo de circuito equivalente cuando menciona dicha prueba en ésta misma norma, enuncia cierta diferencia con respecto al como fue definida la prueba (el ensayo está definida a frecuencia nominal pero en el desarrollo del circuito equivalente enuncia que la prueba puede realizarse a media y un cuarto de frecuencia nominal).
- Previo a la prueba según el diseño del motor, rotor bobinado o jaula de ardilla, se determina o no respectivamente, la impedancia del rotor la cual es relativa a la posición angular, esta condición es enunciada en las normas IEEE Std 112-2004 y en la IEC 60034-2-1 (NTC 3477, 2008) pero no indicada en la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).

- Para la aplicación del ensayo a una frecuencia distinta a la nominal se requiere un montaje distinto ya que se hace necesaria la aplicación de un variador de frecuencia.
- En los ensayos a frecuencia reducida se observó que mientras más pequeña es la frecuencia más difícil es alcanzar el valor nominal de la corriente que requiere el motor en estudio.
- En la fase previa al ensayo (revisión, verificación de conexiones y constatar funcionalidad de equipos e instrumentos) se observó una diferencia en las mediciones en aproximadamente de 1 A, entre los amperímetros del tipo hierro móvil que son capaces de operar de 15 a 1000 Hz y del tipo electrodinámico pueden operar en un amplio espectro, siendo estos los más confiables para una prueba de 15 Hz. La prueba se realizó con instrumentos del tipo hierro móvil dado a la poca existencia de instrumentos electrodinámicos en buen estado.

4.13.5 En la determinación del circuito equivalente

4.13.5.1 Observación y/o comparación

Para iniciar se presenta tabla 4.13.3 con los resultados finales de los parámetros del circuito equivalente y sus respectivos nombres definidos según cada norma.

Tabla 4.13.3. *Parámetros del circuito equivalente según las normas IEEE Std 112-2004, Método 1 y la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008)*

Parámetros	IEEE Std 112-2004, Método 1.		IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).		Diferencia porcentual [%]
	Variable [Unid.]	Valor	Variable [Unid.]	Valor	
Resistencia del estator.	R_1 [Ω]	0,80	R_s [Ω]	0,80	0,00
Reactancia del estator.	X_1 [Ω]	1,861	X_s [Ω]	1,57912	15,13948
Resistencia del hierro.	R_{fe} [Ω]	478,15	R'_{fe} [Ω]	514,63	7,09
Reactancia magnetizante.	X_M [Ω]	28,825	X_m [Ω]	28,81649	0,03057
Resistencia del rotor.	R_2 [Ω]	0,384	$R'_{r,25}$ [Ω]	0,53313	28,02027
Reactancia del rotor.	X_2 [Ω]	2,778	X_r [Ω]	2,35690	15,13948

Donde la tabla anterior revela una diferencia considerable del 15,14 % entre las reactancias representativas del estator y del rotor, esta diferencia puede estar motivada a que la norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) presenta un metodología donde toma en cuenta más información que la norma IEEE Std 112-2004, aparte que realiza un manejo matemático distinto el cual es directamente apreciable como por ejemplo en la resistencia del rotor, que se observa una diferencia de 28,02 %, ésta se puede considera como consecuencia de que la norma IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008) aplica el modelo tipo “ π ” del circuito equivalente mientras la IEEE Std 112-2004 aplica un modelo tipo “T”, mientras los otros parámetros presenta una diferencia máxima del 7,09 %.

Dado a que no basta un análisis cuantitativo se presenta la siguiente tabla 4.13.4 donde se observa y compara aspectos importantes que define cada norma.

Tabla 4.13.4. *Observación y comparación de aspectos que definen el proceso de determinación del circuito equivalente según la Norma IEEE Std 112, 2004. Método 1 y la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).*

Aspectos	IEEE Std 112-2004, Método 1.	IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).
Determinaciones realizadas en conexión.	Estrella (Y).	Estrella (Y) y delta (Δ).
Datos requeridos.	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de la resistencia del estator. • Prueba de vacío. • Prueba de rotor bloqueado al 25 % de la frecuencia nominal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de la resistencia del estator. • Prueba de carga y medición de la temp. al final del ensayo. • Prueba de vacío y medición de temp. al final del ensayo • Prueba de rotor bloqueado principalmente a frecuencia nominal, opcional según el método al 50 y 25 % de la frecuencia nominal.
Dirigido a ciertas máquinas asincrónicas (tamaño constructivo, potencia, etc.).	No.	Si.
Alcance según la norma de procedencia.	Determinación de la eficiencia.	Determinación de los parámetros del circuito equivalente.
Proceso en que se basa su desarrollo.	Aplica los modelos matemáticos según la prueba para desarrollar un proceso iterativo.	Aplica los modelos matemáticos según la prueba para desarrollar interpolaciones gráficas.
Proceso para determinar pérdidas constantes o mecánicas.	Interpolación lineal de la potencia de entrada en vacío en función de la tensión inducida al cuadrado.	Interpolación lineal de la potencia de entrada en vacío menos las pérdidas del cobre en el estator y esta potencia resultante en función de la tensión de línea del estator.
Descripción metodológica.	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de entender. • Es corto. • Las ecuaciones están directamente expresadas a la variable de interés. 	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso más complicado. • Es largo. • Las ecuaciones están indirectamente expresadas a la variable de interés.

Al observar los aspectos que define en la tabla anterior para cada norma resulta difícil de cuantificar o valorar de alguna forma, dado a que cada aspecto tiene una razón del porque debe ser así, indicando características superficiales del método, pero que de alguna manera siguen siendo características.

Dado a los argumentos ya expuestos, la presentación de datos sobre las pautas dictadas por estas normas, a la comprobación de que las pruebas requeridas por cada

metodología son realizables, se concluye que la determinación de los parámetros del circuito equivalente según las Normas IEC 60064-28 (NTC 5642, 2008) y la IEEE Std 112-2004, son totalmente realizables el LME de la EIE-UCV. Y en comparación con la guía de máquinas eléctricas de la EIE-UCV el Método “B” expuesto se presenta discontinuado en la IEEE Std 112-2004.

4.13.6 En la determinación del par inducido de la máquina

4.13.6.1 Observación y/o comparación

Dado a que se realizó la determinación del par inducido de la máquina por el método enunciado en el [numeral 4.12](#) y basado en los resultados del circuito equivalente de la IEEE y la IEC, se presenta los resultados en la tabla 4.13.5, donde se observa que las diferencias son de decimas, debido a que realmente la única variable que define una diferencia en el par inducido es la resistencia en el hierro, según se evidencia en las ecuaciones (61) y (62) del [numeral 4.12.2](#). Además hay que tener presente que según la [tabla 4.13.3](#) la diferencia porcentual entre normas para el parámetro de la resistencia en el hierro es del 7,07 %, una diferencia pequeña y que por la naturaleza propia de la ecuación que la rige es de poca influencia en el resultado final, el par inducido.

Tabla 4.13.5. *Resultados del par inducido el función de los parámetros del circuito equivalente según la Norma IEEE 112-2004, Método 1 y la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008).*

Corriente de fase del estator [A]	Par inducido de la máquina [N.m]	
	IEEE Std 112-2004, Método 1	IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008)
19,63	73,680	73,81059
18,01	68,442	68,57373
14,55	54,615	54,74852
10,85	38,033	38,16907
7,62	15,229	15,36793
6,47	15,512	15,65343

4.14 Ensayos para la determinación de la potencia nominal y corriente a plena carga.

4.14.1 Objetivo

Determinar la logística necesaria para ejecutar el ensayo de potencia nominal y corriente a carga plena para comprobar y comparar con lo existente en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la EIE-UCV.

Esta consiste en la aplicación de una prueba de carga a tensión nominal constante posterior a la estabilidad térmica de la máquina, también requiere la aplicación de la medición de la resistencia en frío y la temperatura de operación nominal de la máquina para la determinación de la temperatura de alza, además exige las pruebas de vacío y de rotor bloqueado para obtener los parámetro del circuito equivalente incluyendo las pérdidas, para calcular finalmente la potencia a la cual opera y por medio de una comparación con el valor indicado en la placa determinar la condición de la máquina.

Dado que la primera máquina de estudio, presenta característica de potencia muy superiores a las otras máquinas presentes en el banco 3, resulta imposible cargarla nominalmente para un tiempo prolongado según lo requerido, para el objetivo de comprobación de potencia nominal. Entonces para cumplir con esto se cambia la máquina de estudio a la máquina descrita en la [tabla 4.1.5](#) del [numeral 4.1](#) (**Máquina asincrónica, rotor bobinado de color roja**).

Hay que destacar que el único nivel de tensión disponible en el LME de la EIE-UCV es de 208 V.

4.14.2 Pruebas y determinaciones requeridas

- Prueba de medición de resistencia en frío y a la temperatura de operación nominal, para determinar temperatura de alza en la máquina de estudio.
- Prueba de aumento de temperatura a carga nominal.
- Prueba de carga a tensión nominal y a temperatura estable de operación.
- Prueba en vacío.
- Prueba con rotor bloqueado.
- Determinación de pérdidas y potencia nominal.

4.14.3 Condiciones generales

- El ensayo de aumento de temperatura debe realizarse en un lugar libre de corriente de aire.
- Cuando el punto más caliente debido a operación nominal de la máquina sea inaccesible o no cuente con sensores internos de temperatura, se obtendrá la temperatura del punto más caliente, por medio de la medición de la resistencia del estator, luego de alcanzar la estabilidad térmica en una prueba de carga a tensión nominal y por lo tanto requiere una previa medición de la resistencia estática en frío.

NOTA: Existen máquinas que en su valor de placa indican la temperatura de alza tanto del estator como la del rotor (°C rise by rotor), la condición anterior es perfectamente aplicable también al rotor, aunque es suficiente trabajar con el estator.

- Se debe censar la temperatura aproximadamente cada diez minutos para verificar la estabilidad térmica en el punto más caliente de la máquina, en caso de ser inaccesible se puede usar de preferencia y como mínimo tres puntos referenciales cualesquiera como carcasa, eje, devanado estático o rotórico, e incluso la temperatura del ambiente, a no más de un metro de distancia de está. Cuando se mida preferiblemente tres o más puntos de temperatura consecutivamente iguales en cada punto referencial o en el punto más caliente, se puede garantizar de forma lógica la estabilidad térmica.

4.14.4 Metodología

Dado a que no se encontró una norma la cual exponga la comprobación de la potencia nominal a una corriente a plena carga se decidió realizar una adaptación de la prueba de aumento de temperatura de transformadores según la Norma COVENIN 3172:1995. Transformadores de potencia. Métodos de ensayos, para ser aplicado a la máquina asincrónica de rotor bobinado, teniendo en cuenta que cada prueba básica que conforma la determinación de potencia nominal debe estar dirigida o especificada a la naturaleza de la máquina, sea DC, jaula de ardilla, asincrónica de rotor bobinado o sincrónica.

Pasos:

1. Medir la resistencia del estator en frío.
2. Cargar el motor de prueba nominalmente para el ensayo de aumento de temperatura.
3. Tomar mediciones de temperatura en mínimo tres puntos referenciales cada diez minutos, hasta identificar la estabilidad térmica del motor.
4. Mientras se espera obtener la estabilidad térmica, se recomienda realizar observaciones durante la prueba y en el caso de ser necesario hacer las correcciones para mantener la carga a valor nominal sobre la máquina de prueba.
5. Al ser identificada la estabilidad térmica realizar las mediciones pertinentes a la prueba de carga a plena carga y luego determinar la temperatura de operación del motor.

6. Se obtiene la temperatura de alza y si está supera al valor de placa suspenda la prueba.
7. Realice las pruebas y determinación (determinación de la resistencia del estator, prueba de vacío, de rotor bloqueado) que se requiere para determinar el circuito equivalente (según la Norma IEEE Std 112-2004).
8. Con los datos de la prueba de carga a plena carga, los valores obtenidos en la determinación del circuito equivalente y valores de placa de la máquina, determine las pérdidas en el cobre, luego calcule la potencia de salida y compare con el valor de placa para la verificación del mismo.

4.14.5 Diagramas de conexiones

4.14.5.1 Para la medición de resistencia

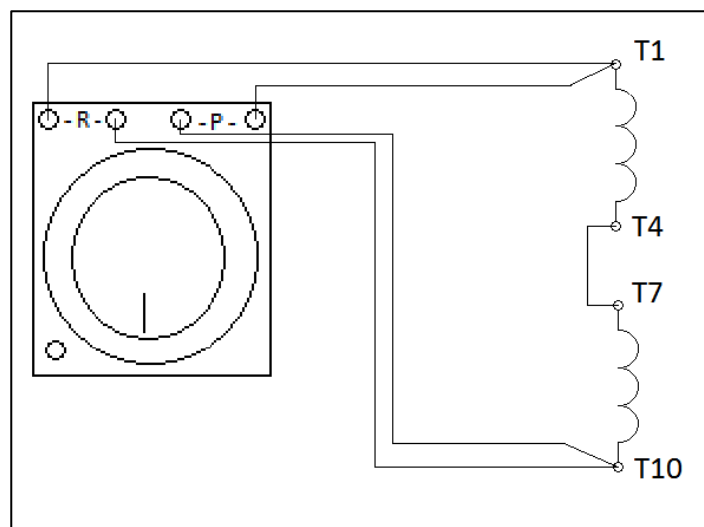


Figura 4.14.1. Diagrama de conexiones para determinar la resistencia de fase de la máquina asincrónica, rotor bobinado (Roja).

4.14.5.2 Para la prueba de aumento de temperatura y prueba de carga a tensión nominal

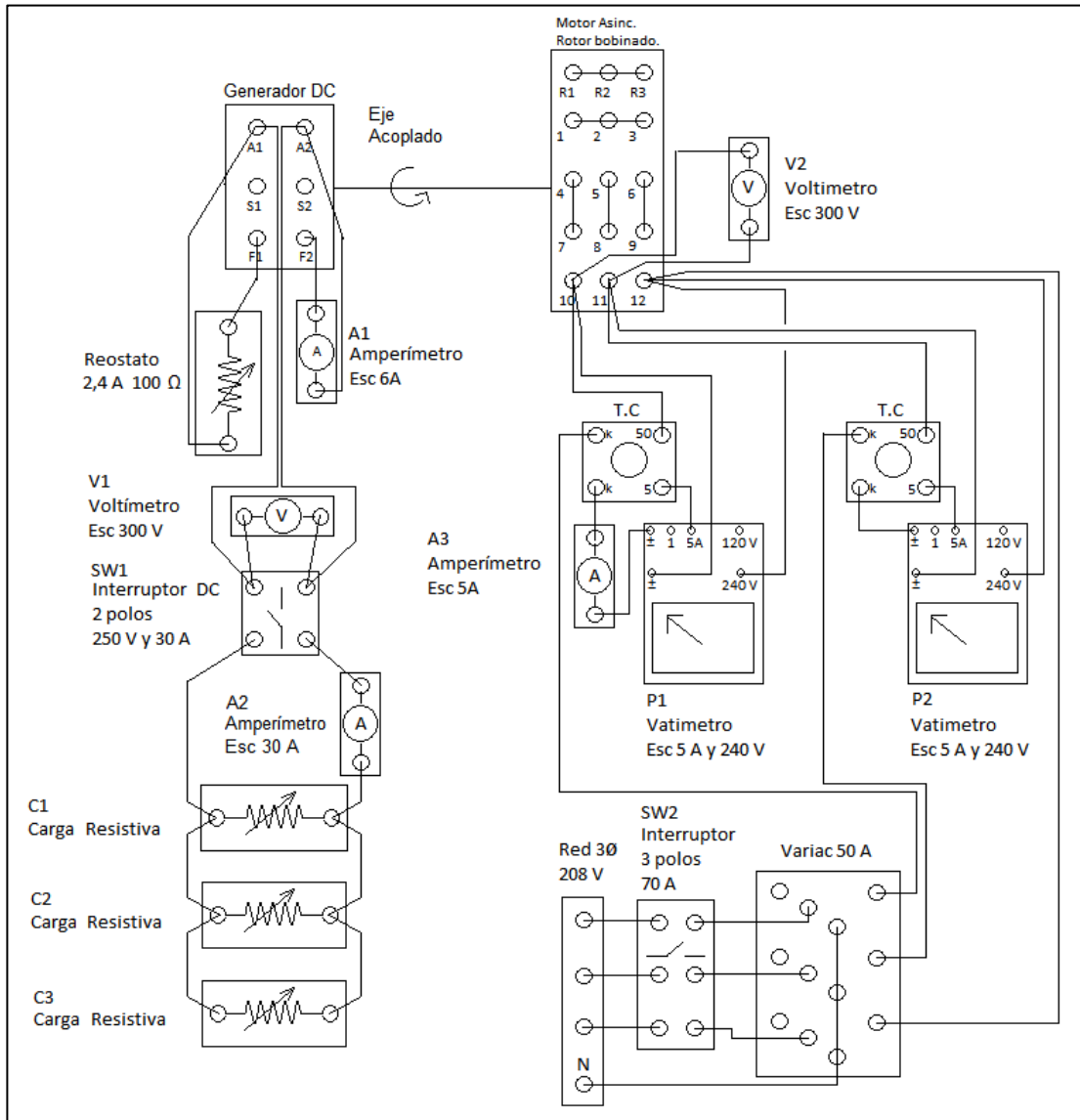


Figura 4.14.2. Diagrama de conexiones para la prueba de aumento de temperatura y prueba de carga a tensión nominal en el motor asincrónico, rotor bobinado (Roja).

4.14.5.3 Para la prueba de vacío

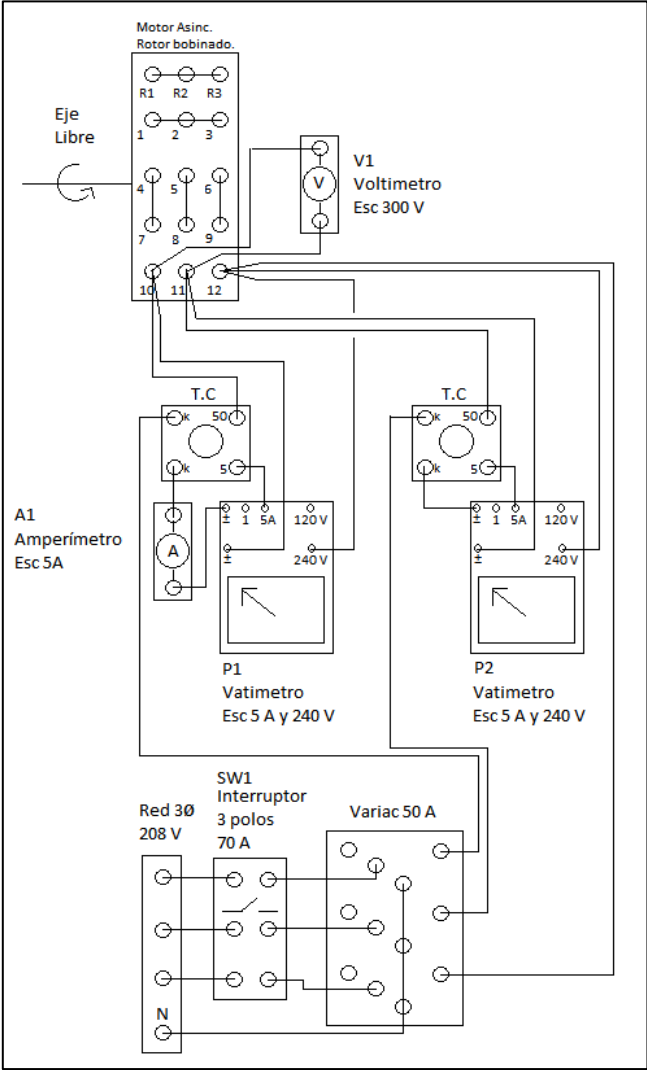


Figura 4.14.3. Diagrama de conexiones para la prueba de vacío en el motor asincrónico, rotor bobinado (Roja).

4.14.5.4 Para la prueba de rotor bloqueado al 25 % de la frecuencia nominal

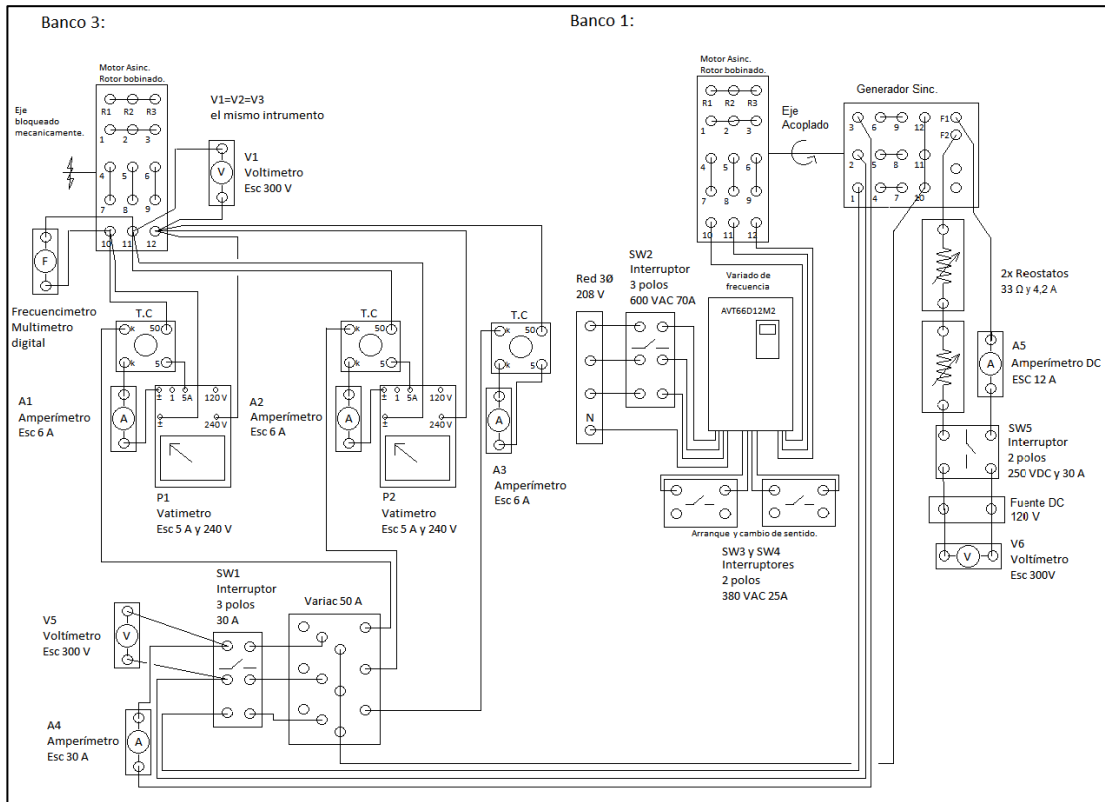


Figura 4.14.4. Diagrama de conexiones para la prueba de rotor bloqueado al 25 % de la frecuencia nominal para el motor asincrónico, rotor bobinado, banco 3 (Roja).

4.14.6 Instrumentos y equipos disponibles en el LME de la EIE-UCV

4.14.6.1 Para la prueba de aumento de temperatura y prueba de carga a tensión nominal

Para el generador DC (Azul, banco 3) (valores de placa ver la [tabla 4.1.3](#) de [numeral 4.1](#)):

- Reostato de 2,4 A y 100 Ω, EIE2012.341.

- Amperímetro (A1) marca Goerz Electro, del tipo hierro móvil, AC y DC, clase 0,5 , escala 6 A, uso en posición horizontal y EIE2012.181.
- Amperímetro (A2) marca Trub Tauber Zurich, del tipo hierro móvil, AC y DC, clase 0,5 , uso en posición horizontal y EIE2012.173.
- Voltímetro (V1) marca Yokogawa, modelo 2011, del tipo bobina móvil, DC, clase 0,5 , escala 30, 100, 300 y 1000 V, uso de posición horizontal, resistencia interna 1000 Ω/V y EIE2012.024.
- Interruptor DC (SW1) dos polos, 250 V y 30 A.
- Cargas resistivas puras (C1 y C2) marca LABEC, 4 kW, en 3 \emptyset 220 V y 380 V, en 1 \emptyset 220 V.
- Carga resistiva de cuchilla (C3), 990 Ω , 230 V, 11,5 A y EIE2012.444.

Para el motor asincrónico, rotor bobinado (Rojo, banco 3) (valores de placa ver la [tabla 4.1.5](#) del [numeral 4.1](#)):

- Cuenta revoluciones o tacómetro, marca Hasteragbern y serial EIE2012.079.
- Amperímetro (A3) tipo electrodinámico, AC – DC, clase 0,2 , uso en posición horizontal, escalas de 5 y 2,5 A, resistencia interna 0,28 y 1,12 Ω , marca Trub Tauber Zurich, serial UCV 08-9047.

- Dos transformadores de corriente (T.C), marca Stormwandler, 5 VA, corriente de entrada 5, 10, 25 y 50 A, corriente de salida 5 A, seriales EIE2012.207 y EIE2012.210.
- Dos vatímetros (P1 y P2) del tipo electrodinámico, marca Yokogama, modelo 2041, AC y DC, uso de posición horizontal, escala en la bobina voltimétrica de 120 y 240 V, escala de bobina amperimétrica de 1 y 5 A, para aplicar método de los dos vatímetros, seriales EIE2012.062 y EIE2012.063.
- Voltímetro (V1) tipo electrodinámico, AC – DC, clase 0,2 , uso en posición horizontal, escalas de 150, 300, 450 y 600 V, resistencia interna 32,93 Ω/V , marca Trub Tauber Zurich, serial UCV 08-9033.
- Interruptor automático (SW2) AC, 3 polos, 70 A, 600 V, marca Disioncteur (se recomienda un interruptor de 50 A). EIE2012.412.
- Variac trifásico, valores por fase: 7 kVA, 50 A, 120 V input, 0 a 140 V out, marca Powerstat y serial EIE2012.446.
- Termómetro digital marca 3M Company, modelo IR-16EXL3 y made in de USA mayo 1998.
- Óhmetro tipo puente de Kelvin, bobina móvil, DC, uso en posición horizontal, escalas de 0,01 ; 0,1 y 1 Ω , marca Trub Teuber Zurich, serial EIE2012.113.

4.14.6.2 Para la prueba de vacío

Para el motor asincrónico, rotor bobinado (Rojo, banco 3) (valores de placa ver [la tabla 4.1.5](#) del [numeral 4.1](#)):

- Amperímetro (A1) tipo electrodinámico, AC – DC, clase 0,2 , uso en posición horizontal, escalas de 5 y 2,5 A, resistencia interna 0,28 y 1,12 Ω , marca Trub Tauber Zurich, serial UCV 08-9047.
- Dos transformadores de corriente (T.C), marca Stormwandler, 5 VA, corriente de entrada 5, 10, 25 y 50 A, corriente de salida 5 A, seriales EIE2012.207 y EIE2012.210.
- Dos vatímetros (P1 y P2) del tipo electrodinámico, marca Yokogama, modelo 2041, AC y DC, uso de posición horizontal, escala en la bobina voltimétrica de 120 y 240 V, escala de bobina amperimétrica de 1 y 5 A, para aplicar método de los dos vatímetros, seriales EIE2012.062 y EIE2012.063.
- Voltímetro (V1) tipo electrodinámico, AC – DC, clase 0,2 , uso en posición horizontal, escalas de 150, 300, 450 y 600 V, resistencia interna 32,93 Ω/V , marca Trub Tauber Zurich, serial UCV 08-9033.
- Interruptor automático (SW1) AC, 3 polos, 70 A, 600 V, marca Disioncteur (se recomienda un interruptor de 50 A). EIE2012.412.
- Variac trifásico, valores por fase: 7 kVA, 50 A, 120 V input, 0 a 140 V out, marca Powerstat y serial EIE2012.446.

4.14.6.3 Para la prueba de rotor bloqueado al 25 % de la frecuencia nominal

Para realizar esta prueba son requeridas las máquinas del banco 1, el generador sincrónico (color amarilla) (ver [tabla 4.1.1](#)) y el motor asincrónico de rotor bobinado (color roja) (ver [tabla 4.1.2](#)), y del banco 3 la máquina para el estudio, el motor asincrónico de rotor bobinado (color roja) (ver [tabla 4.1.5](#)).

Además de los siguientes instrumentos o equipos:

- Amperímetro (A1, A2 y A3) marca Goerz Electro, del tipo hierro móvil, AC y DC, clase 0,5 , escala 1,2 y 6 A, uso en posición horizontal, EIE2012.181, EIE2012.177 y EIE2012.025.
- Dos vatímetros (P1 y P2) del tipo electrodinámico, marca Yokogama, modelo 2041, AC y DC, uso de posición horizontal, escala en la bobina voltimétrica de 120 y 240 V, escala de bobina amperimétrica de 1 y 5 A, para aplicar método de los dos vatímetros, seriales EIE2012.062 y EIE2012.063.
- Tres transformadores de corriente (T.C), marca Stormwandler, 5 VA, corriente de entrada 5, 10, 25 y 50 A, corriente de salida 5 A, seriales EIE2012.207, EIE2012.210 y EIE21012.206.
- Frecuencímetro (f) Multímetro digital Fluke 175 True rms.
- Voltímetro (V1, V2 y V3) marca Trub Tauber Zurich, del tipo hierro móvil, AC y DC, uso en posición horizontal serial EIE2012.035.

- Variac trifásico, valores por fase: 7 kVA, 50 A, 120 V input, 0 a 140 V out, marca Powerstat y serial EIE2012.446.
- Interruptor automático (SW1) marca Cutler-Hammer, modelo HFD 65k, 3 polos, 30 A, 600 V_{ac}, 250 V_{dc}, 40° C, serial EIE2012.414.
- Amperímetro (A4) marca Trub Tauber Zurich, del tipo hierro móvil, AC y DC, clase 0,5 , uso de posición horizontal, escala 6 y 30 A y serial EIE2012.173.
- Reostato de 4,2 A y 33 Ω , serial EIE2012.353.
- Amperímetro (A5) marca Goerz Electro, del tipo hierro móvil, DC, clase 0,5 , uso de posición horizontal, escala 3 y 12 A y serial EIE2012.178.
- Voltímetro (V5) marca Trub Tauber Zurich, del tipo electrodinámico, AC y DC clase 0,2, uso en posición horizontal, resistencia interna de 32,7 Ω/V , escala 150, 300, 450 y 600V, y serial UCV 08-9033.
- Voltímetro (V6) marca Yokogawa, modelo 2011, del tipo bobina móvil, DC, clase 0,5 , escala 30, 100, 300 y 1000 V, y uso en posición horizontal.
- Interruptor DC (SW5) de 250 V y 30 A.
- Variador de frecuencia AVT66D12M2, valores de entrada: 208 V, 45 A y 60 Hz, valores de salida. 208 V, 45 A, de 0 a 60 Hz.

- Interruptor automático (SW2) AC, 3 polos, 70 A, 600 V, marca Disjoncteur (se recomienda un interruptor de 50 A). EIE2012.412.
- Dos interruptores automáticos (SW3 y SW4) marca Ticino, 2 polos, 25 A, 380 V y seriales EIE2012.417 y EIE2012.408.

4.14.7 Datos experimentales y determinaciones

Para la tabla 4.14.1 se indica las mediciones realizadas en intervalos de cada 10 minutos además de mostrar si hubo o no una corrección para con los valores nominal de la máquina en lo que respecta a tensión y corriente.

Tabla 4.14.1. *Datos experimentales de la prueba de aumento de temperatura.*

Hora de la medición	T1 [°C] Carcaza	T2 [°C] Estator	T3[°C] Eje	T4 [°C] Ambiente	±ΔT [°C]	I[A]	±ΔI[A]	V[V]	±ΔV[V]	corrección
10:37 a.m	23,3	23,3	23,2	23,3	0,1	13,2	0,2	220	2	no
10:47 a.m	26,7	26,4	33,8	24,2	0,1	13,2	0,2	220	2	no
10:57 a.m	28,3	31,3	34,7	24,5	0,1	13,0	0,2	220	2	no
11:07 a.m	29,4	31,9	35,7	24,7	0,1	13,0	0,2	220	2	no
11:17 a.m	29,8	32,2	36,6	24,7	0,1	12,8	0,2	220	2	si
11:27 a.m	30,8	32,2	38,4	25,2	0,1	12,8	0,2	220	2	si
11:37 a.m	31,5	32,8	35,3	25,0	0,1	13,2	0,2	220	2	no
11:47 a.m	32,1	34,7	36,7	25,7	0,1	13,0	0,2	220	2	no
11:57 a.m	32,1	34,8	37,1	25,6	0,1	13,0	0,2	220	2	no
12:07 p.m	32,1	34,9	37,1	25,5	0,1	12,8	0,2	220	2	si
12:17 p.m	32,1	35,2	37,1	25,6	0,1	13,2	0,2	220	2	no
12:27 p.m	32,1	35,2	37,2	25,6	0,1	13,2	0,2	220	2	no
12:37 p.m	32,1	35,5	37,2	25,5	0,1	13,2	0,2	220	2	no
12:47 p.m	32,2	35,6	37,2	25,6	0,1	13,2	0,2	220	2	no
12:57 p.m	32,2	35,6	37,2	25,8	0,1	13,0	0,2	220	2	no
01:07 p.m	32,2	35,6	37,2	26,1	0,1	13,0	0,2	220	2	no
01:17 p.m	32,2	35,6	37,2	26,1	0,1	13,0	0,2	220	2	no

Donde ésta última tabla se reporta en cada medición una corrección, bien sea en la carga o en la alimentación del motor asincrónico con el fin de mantener una operación estrictamente nominal en la máquina.

Dada la estabilidad térmica y realizada la prueba de carga a plena carga, se obtuvo los siguientes datos que se muestra en la tabla 4.14.2.

Tabla 4.14.2. *Datos de la prueba de carga a tensión nominal al obtener la estabilidad térmica.*

I[A]	$\pm\Delta I$ [A]	V[V]	$\pm\Delta V$ [V]	N [rpm]	$\pm\Delta N$ [rpm]	Pc [W] 3 ϕ	$\pm\Delta Pc$ [W]
13,0	0,2	220	2	1140	2	4700	100

Y con la medición de la resistencia, antes y después de la prueba de aumento de temperatura, mostrada en la tabla 4.14.3.

Tabla 4.14.3. *Datos experimentales y determinación de la temperatura de operación del motor asincrónico rotor bobinado por medio de la medición de la resistencia.*

Terminales	R(fase)	Rx [Ω]	$\pm\Delta Rx$ [Ω]	Esc. usada
En frío (23,3 \pm 0,1) °C :				
T1 a T10	RA	0,28	0,01	0,1
T2 a T11	RB	0,28	0,01	0,1
T3 a T12	RC	0,29	0,01	0,1
R1 (promedio)		0,28	0,01	
En estabilidad térmica:				
T1 a T10	RA	0,31	0,01	0,1
T2 a T11	RB	0,31	0,01	0,1
T3 a T12	RC	0,30	0,01	0,1
R2 (promedio)		0,31	0,01	

Donde:

R1 : es la resistencia del estator sin factor de corrección por temperatura (medición directa).

R2 : es la resistencia del estator con factor de corrección por temperatura.

Se determinó la temperatura de operación de la máquina en el punto más caliente por medio de la ecuación (3) del [numeral 3.2.4.4](#) donde la variable de interés es T_2 , y el resultado es:

$$T_2[^\circ\text{C}] = (44,57 \pm 19,09) ^\circ\text{C}$$

Además conocida la temperatura ambiente ($26,1^\circ\text{C}$, tabla 4.14.1) al final de la prueba de aumento temperatura, se calcula la temperatura de alza que presenta el motor luego de alcanzar la estabilidad térmica por medio la ecuación (67).

$$^\circ\text{C rise (exp)} = T_2 - T_{amb}$$

Ec. 67

Resultando una temperatura de alza igual a:

$$^\circ\text{C rise (exp)} = (18,47 \pm 19,19) ^\circ\text{C} < 40 ^\circ\text{C}$$

La cual es menor al dato dado en el valor de placa (40°C rise), esto indica que la máquina está sobredimensionada ya que no estaba a plena carga.

Ahora se presenta las mediciones realizadas en la prueba de vacío para la máquina de estudio en la tabla 4.14.4.

Tabla 4.14.4. *Datos de la prueba de vacío aplicado sobre el motor asincrónico rotor bobinado.*

Medición	Tensión[%]	V [V]	$\pm\Delta V$ [V]	I [A]	$\pm\Delta I$ [A]	Pv [W] 3 ϕ	$\pm\Delta Pv$ [W]
1	112,7	248	2	7,6	0,1	580	40
2	100,0	220	2	6,6	0,1	500	40
3	80,0	176	2	5,1	0,1	400	40
4	59,5	131	1	3,9	0,1	360	40
5	50,0	110	1	3,4	0,1	340	40
6	25,0	55	1	3,4	0,1	280	40
7	-	-	-	-	-	-	-

Para la séptima medición la corriente comenzó a incrementarse por lo tanto se omitió dicha medición.

Las mediciones tomadas para la prueba de rotor bloqueado se dan a conocer en la tabla 4.14.5.

Tabla 4.14.5. *Datos de la prueba de rotor bloqueado del motor asincrónico rotor bobinado*

Medición	Carga [%]	I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]	$\pm\Delta I$ [A]	I promedio [A]	V1 [V]	V2 [V]	V3 [V]	$\pm\Delta V$ [V]	V promedio [V]	Prb [W] 3 ϕ	$\pm\Delta P1$ [W]
1	52	13,0	14,5	14,5	0,5	14,0	22,5	22,0	22,0	0,5	22,2	425	50
2	48	12,0	13,0	14,0	0,5	13,0	20,0	19,5	20,0	0,5	19,8	400	50
3	44	11,0	12,5	12,5	0,5	12,0	19,5	19,0	19,0	0,5	19,2	325	50

Con los datos mostrados en las tablas 4.14.1, a la 4.14.5, se determina el circuito equivalente a la temperatura de operación de la máquina y además se utilizan otros datos como consecuencia de esta determinación para la calcular la potencia a la cual está trabajando el motor.

A partir de la tabla 4.14.6 a la 4.14.9 se muestra los datos necesarios para la determinación de la potencia nominal de la máquina asincrónica de rotor bobinado.

Tabla 4.14.6. *Datos básicos de placa de la máquina.*

VL [V]= 220
IL [A]= 13,1
Speed [rpm]= 1200
P. ent [W]= 4000
S. ent [VA]= 5000
°C rise= 40

Tabla 4.14.7. *Parámetros del circuito equivalente a la temperatura de operación de 44,57° C.*

R1 [Ω]= 0,31
X1 [Ω]= 0,800
Rfe [Ω]= 233,094
XM [Ω]= 18,999
R2 [Ω]= 0,524
X2 [Ω]= 0,800

Tabla 4.14.8. *Datos necesarios de la determinación del circuito equivalente a la temperatura de operación de 44,57° C.*

Pfe [W]= 63,737
Pmec [W]= 89,733
E10 [V]= 121,477

Tabla 4.14.9. *Datos de aumento de temperatura de la prueba de carga a tensión nominal de fase.*

I[A]= 13,0
V[V]= 127,0
N [rpm]= 1140
Pc [W] 1Ø= 1567

Ahora con los datos anteriores se puede realizar los siguientes cálculos.

Determinación del deslizamiento en operación nominal a 44,57° C, aplicando la ecuación (68).

$$s_{nom} = \frac{n_{sinc} - n_{eje}}{n_{sinc}}$$

Ec. 68

Calculo de la corriente del rotor de fase usando la ecuación (69).

$$I_2 = \frac{E_0}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}$$

Ec. 69

Determinación de la potencia trifásica de operación a la temperatura de 44,57° C por medio de la ecuación (70).

$$P_{sal} = 3 \cdot [P_{ent} - (I_1^2 \cdot R_1) - p_{fe} - (I_2^2 \cdot R_2) - p_{mec}]$$

Ec. 70

Además se anexa el cálculo de la eficiencia de la máquina por medio de la ecuación (71).

$$Ef = \frac{P_{sal}}{3 \cdot P_{ent}}$$

Ec. 71

Donde:

s_{nom} : Deslizamiento de la máquina en operación nominal a la temperatura de 44,57° C.

n_{sinc} : Velocidad angular nominal de la máquina [rpm].

n_{eje} : Velocidad angular del rotor de la máquina [rpm].

I_2 : Corriente de fase en el rotor [A].

I_1 : Corriente de fase en el estator [A].

E_0 : Tensión de fase inducida en la máquina [V].

E_f : Eficiencia de la máquina por unidad.

R_{fe} : Resistencia de fase en el hierro de la máquina [Ω].

X_m : Impedancia magnética de fase de la máquina [Ω].

P_{sal} : Potencia trifásica de salida del motor [W].

P_{ent} : Potencia monofásica de entrada del motor [W].

R_1 : Resistencia de fase del estor [Ω].

p_{fe} : Perdidas monofásica en el núcleo [W].

p_{mec} : Perdidas mecánicas monofásicas (por ventilación y/o fricción) [W].

Con los resultados de las ecuaciones (68) a la (71), que se muestran en la tabla 4.14.10.

Tabla 4.14.10. *Resultados para la determinación de la potencia de operación nominal de la máquina asíncrona rotor bobinado.*

Snom =	0,05
I2 [A] =	11,6
P.sal [W] =	3873,951
P.sal [HP] =	5,193
Eficiencia =	0,824

Dado a que la máquina indica valores de placa del tipo generador no podemos directamente comparar la potencia de salida (sobre el eje) con algún valor proporcionado por el fabricante, pero es suficiente con el valor de la potencia de entrada (4000 W, ver la [tabla 4.14.6](#)) donde la potencia de salida determinada (3873,95087 W, ver la tabla 4.14.10) lógicamente debe ser inferior, ya que la máquina presento una temperatura de alza (18,47° C) inferior al valor de placa (40° C). Indicando que la máquina opera correctamente.

CONCLUSIONES

En lo que respecta a los ensayos requeridos para la determinación del circuito equivalente según las normas de interés, estas se presentan prácticamente en el mismo esquema, con algunas diferencias menores dado a que los argumentos que las sustentan, son de base muy lógicas para el desarrollo del ensayo, los cuales son requeridas para la determinación del circuito equivalente, está presenta también condiciones según el punto de operación del mismo, pero esto es tomado así solo por fines prácticos y por lo tanto sería un modelo muy aproximado y aceptado, pero no real. Esta idea también es aplicada al como se realiza el modelo del circuito equivalente, donde la IEEE Std 112-2004 aplica un proceso matemático distinto a la IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008), incluso se aplica de forma conveniente los distintos modelos (T y π) que representan a la máquina. Dado a que las pruebas requeridas y presentadas en este trabajo según los organismos de interés, son perfectamente realizables en el LME de la EIE-UCV se concluye que las pautas dictadas por estas organizaciones con el fin de caracterizar la máquina asincrónica es perfectamente aplicable en dicho laboratorio. Además hay que destacar que en el laboratorio se aplican solo ensayos según la IEEE hasta para el momento de la elaboración de este trabajo, con el fin de realizar las determinaciones por los métodos “A” y “B” del guía del LME de la EIE-UCV, donde el método “B” no se encuentra enunciado en la IEEE Std 112-2004.

A pesar que no se encontró una norma directa para comprobar la potencia de la máquina asincrónica, se elaboró una metodología bien detalla para realizar dicha comprobación.

Posterior a la aplicación de la metodología se encontró que la máquina de objeto de estudio maneja la carga señalada por el fabricante y según las determinaciones realizadas ésta se encuentra sobredimensionada, es decir, puede manejar una carga más elevada que la indicada en su placa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COVENIN 3172:1995. Transformadores de potencia. Métodos de ensayo.

Fondonorma 200:2009 Código Eléctrico Nacional (CEN) 2009.

IEC. Bienvenido a la IEC. Recuperado el 23 de abril del 2012 de

http://www.iec.ch/about/brochures/pdf/about_iec/iec_welcome_sp_2010_lr.pdf

IEC 60034-1 (NTC 2805, 2005) *Rotating Electrical Machines. Rating and Performance.*

IEC 60034-2-1 (NTC 3477, 2008) *Rotating Electrical Machines. Standard Methods for Determining losses and efficiency from tests.*

IEC 60034-28 (NTC 5642, 2008). *Rotating electrical machines. Test methods for Determining quantities of equivalent circuit Diagrams for three-phase low-voltage cage Induction motors.*

IEC 61972 (NTC 5293, 2004) *Method for Determining Losses and Efficiency of three phase cage Induction Motors*

IEEE. Recuperado el 23 de abril del 2012 de

http://www.ieee.org/about/ieee_history.html

IEEE Std 112-2004. *Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.*

IEEE Std 118-1978. *Test Code for Resistance Measurement,*

NEMA Standards Publication MG 1-2006 Revision 1. Motors y Generators.

NEMA Motor-Generator Standards for Three-Phase Inductor Motors 1999 (versión condensada).

BIBLIOGRAFÍA

Fraile Mora, J. (2003), *Máquinas Eléctricas*, Quinta edición. Madrid: McGRAW-HILL.

Stephen J, C. (2000), *Máquina Eléctricas*, Tercera edición. Santa Fé de Bogotá: McGRAW-HILL.

Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Potencia, Laboratorio de Máquinas Eléctricas (2011). *Guía del laboratorio de máquinas eléctricas: Máquinas de corriente continua, máquina asíncrona y máquina síncrona*. Caracas: Profesores Chassande, J. Cepada, A. Molina, J. Ojeda, N. y Rangel, R.