



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE NORMAS IEEE112 E IEC 60034 2-1 PARA LA
EVALUACIÓN ENERGÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN DE JAULA DE
ARDILLA**

ANGGY TATIANA PERANQUIVE GÓMEZ

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2021**



ANÁLISIS COMPARATIVO DE NORMAS IEEE112 E IEC 60034 2-1 PARA LA
EVALUACIÓN ENERGÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA

ANGGY TATIANA PERANQUIVE GÓMEZ

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Electrónico

Director:
ING. EDWIN FRANCISCO FORERO GARCÍA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRÓNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2021

Agradecimientos

Sin la guía de Dios nada en esta tierra se hace posible. Inmensa gratitud a Él que me da salud, sabiduría y fortaleza para realizar mis proyectos.

Infinitas gracias a mi madre Martha Cecilia Gómez, mi pilar y heroína, quien siempre tuvo palabras de aliento, amor incondicional y apoyo en todo sentido, porque a pesar de las dificultades siempre me motivó a perseverar hasta el final. Igualmente, a mi padre Hector Peranquive Lombana, por todos los esfuerzos realizados a lo largo de su vida para ofrecerme una carrera profesional y la preciosa posibilidad de seguir mis sueños.

Expreso mis agradecimientos al ingeniero Edwin Francisco Forero, por sus ideas, confianza y apoyo para presentar este proyecto de grado; también, a los jurados Carlos Torres y José Luis Paternina por el tiempo y los valiosos consejos que me brindaron. Igualmente, a todos los profesores de la facultad de ingeniería electrónica que durante la carrera siempre guiaron con ahínco y dedicación el aprendizaje de sus estudiantes e impartieron su sabiduría como grandes personas y profesionales.

Finalmente, agradezco a la facultad de ingeniería electrónica de la universidad Santo Tomas, por concederme la oportunidad de presentar este proyecto de grado que es la culminación de un gran esfuerzo y meta personal.

*Anggy Tatiana Peranquive Gómez
Autor*

Estructura del documento

Este documento se estructura de la siguiente manera:

Capítulo 1, Introducción. Define el contexto en el que se enmarca este proyecto, delimitando el enfoque a motores de rotor de jaula de ardilla. Además, se trazan los objetivos que se desarrollaran en el mismo, igualmente expone la pertinencia de este proyecto de grado argumentado en la sección de Justificación.

Capítulo 2. Panorama actual de la eficiencia energética en el mundo. Presenta un breve resumen de la aceptación en diferentes países de las normas IEEE112 e IEC60034-2-1, su importancia en programas de uso racional de energía en Colombia y finalmente, presenta una lista de trabajos de investigación realizados en años anteriores que estudian la evaluación de eficiencia energética desde el marco normativo internacional o que aplican tecnologías y estrategias de eficiencia energética en varios tipos de máquinas eléctricas.

Capítulo 3. Marco Teórico. Esta sección brinda al lector las herramientas matemáticas exactas sobre las que se puede calcular la eficiencia energética en motores. Revisa y documenta las diferentes metodologías para evaluación de eficiencia energética existentes en las normativas IEEE112 e IEC 60034 2-1. Por otra parte, describe las fórmulas que se extraen de la norma IEEE1459 para calcular la potencia aparente de la fuente, ya que es una variable crítica en el cálculo de la eficiencia energética y a diferencia de las normas IEEE112 e IEC60034-2-1, la analiza con más detalle.

Se presentan dos capítulos diferentes para el análisis de resultados. Ya que el capítulo 4 se centrará únicamente en la norma IEEE112 e IEC 60034-2-1 y el capítulo 5, desarrolla el diseño y evaluación de una nueva metodología basada en las pruebas del capítulo 4.

Capítulo 4. Pruebas de laboratorio y análisis de resultados. Explica cómo se llevaron a cabo las pruebas en el laboratorio de la universidad Santo Tomás del método B del IE IEEE112 (Sección 4.1) y el método para hallar pérdidas residuales a partir de la resistencia E_h -star del IE IEC60034-2-1 (Sección 4.2). Al finalizar se presenta el análisis comparativo de las pérdidas del motor halladas por cada una de las normas (Sección 4.3).

Capítulo 5. Diseño de Metodología y Análisis de resultados. En este capítulo se desarrolla el objetivo específico del proyecto que solicita diseñar un modelo para evaluar la eficiencia de un motor de jaula de ardilla a partir del estudio comparativo de las normas IEEE112 e IEC60034 2-1. Se dividirá en primer lugar, expone las bases sobre la que se diseña una metodología para la evaluación de eficiencia energética en motores de jaula de ardilla (Sección 5.1). A continuación, se numeran los pasos específicos que la componen (Sección 5.2), así como se describe los elementos de la simulación sobre la que se evalúa la nueva metodología propuesta (Sección 5.3). Por último, se presenta el análisis de resultados de la simulación de la metodología propuesta para la evaluación de eficiencia energética en motores de jaula de ardilla y se comparan con los obtenidos en el capítulo 4 (Sección 5.4).

Capítulo 6. Impacto Social. Presenta las ventajas que resultaron de realizar este proyecto de grado para el sector académico e industrial.

Capítulo 7. Trabajos Futuros. En este capítulo se sugieren las pruebas y estudios que dan continuidad al objetivo del proyecto y pueden desarrollarse a futuro con más tiempo.

Capítulo 8. Conclusiones. Presenta declaraciones finales de los resultados y los objetivos cumplidos a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Capítulo 9. Anexos. Numera las tablas que reúnen los datos obtenidos durante las pruebas aplicadas tanto en el laboratorio como en la simulación; también, las que soportan análisis de resultados y finalmente, muestra un segundo flujograma de la metodología propuesta para la evaluación de eficiencia energética en motores de jaula de ardilla para aplicarlo en un laboratorio real en trabajos futuros.

Capítulo 10. Referencias. En este capítulo final, se enlista las normativas, informes y libros consultados en este proyecto.

Tabla de contenido

1. Introducción	12
1.1. Objetivos	13
1.2. Justificación.....	14
2. Panorama actual de eficiencia energética en el mundo	16
3. Marco Teórico	19
3.1. Eficiencia Energética.....	19
3.2. IEEE112 Procedimiento de prueba estándar para generadores y motores de inducción polifásicos	21
3.3. IEC60034-2-1 Métodos para la determinación de la eficiencia para máquinas eléctrica rotativas.....	38
3.4. IEEE 1459- Definiciones estándar para la medición de energía eléctrica.....	46
4. Pruebas de Laboratorio y Análisis de resultados.....	51
4.1. Método B del IE IEEE112	52
4.2. Método Eh-star del IE IEC60034-2-1	54
4.3. Análisis comparativo de las pérdidas del motor calculadas con la norma IEEE112 e IE IEC60034-2-1.....	57
5. Diseño de Metodología y Análisis de Resultados	64
5.1. Presentación	64
5.2. Esquema procedimental de la metodología.....	64
5.3. Simulación de la metodología	68
5.4. Análisis de Resultados de la simulación aplicando la norma IEEE1459	72
6. Impacto Social.....	77
7. Trabajo futuro.....	78
8. Conclusiones	79
9. Anexos.....	80
Anexo A	80
Anexo B	81
Anexo C	82
Anexo D	83
Anexo E.....	84
Anexo F.....	85
Anexo G	86

Anexo H	87
Anexo I.....	88
Anexo J.....	89
Anexo K	89
Anexo L.....	90
Anexo M.....	91
Anexo N	92
Anexo O	94
Anexo P	95
10. Referencias.....	99

Índice de Tablas

Tabla 1: Lista de métodos para la determinación de la eficiencia energética de norma IEEE112.	21
Tabla 2: Porcentaje de pérdidas residuales asumidos para métodos E1, F1 y E1/F1 de la norma IEEE112. Fuente: (IEEE, IEEE112 Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, 2004)	25
Tabla 3: Prueba de frecuencia fundamental y a altas frecuencias para el método E. Fuente: (IEEE, IEEE112 Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, 2004)	33
Tabla 4: Porcentaje de pérdidas residuales asumidos para métodos E1, F1 y E1/F1 de la norma IEEE112. Fuente: (IEEE, 2010).....	33
Tabla 5: Diagrama representativo de organización de la norma IEC60034-1-2 Fuente: Autor.....	38
Tabla 6: Pérdidas residuales PLL dependiendo de la potencia útil de la máquina rotativa. Fuente: (IEC, 2007)	42
Tabla 7: Resultados de la resistencia R-eh calculados para el motor conectada en estrella y en delta. Fuente: Autor	44
Tabla 8: Cantidades de potencias para un sistema trifásico no sinusoidal. Fuente: (IEEE, 2010)	47
Tabla 9: Características obtenidas del motor de jaula de ardilla LabVolt Series 8221-00. Fuente: (LabVolt_Series).....	52
Tabla 10: Resultados de la medida de temperatura durante la prueba con carga. Fuente: Autor.	52
Tabla 11: Resultado de la prueba de resistencia del estator en frío. Corresponden a las resistencias durante el torque máximo y nominal de la prueba respectivamente. Fuente: Autor.	52
Tabla 12: Pérdidas por fricción y viento del motor calculadas de acuerdo al IE IEEE112 e IE IEC60034-2-1. Autor: Fuente.....	58
Tabla 13: Pérdidas en el núcleo del motor calculadas de acuerdo al IE IEEE112 e IE IEC60034-2-1. Autor: Fuente.....	59
Tabla 14: Pérdidas en el estator del motor calculadas de acuerdo al IE IEEE112 e IE IEC60034-2-1. Autor: Fuente.....	59
Tabla 15: Pérdidas en el rotor del motor calculadas de acuerdo al IE IEEE112 e IE IEC60034-2-1. Autor: Fuente.....	60
Tabla 16: Pérdidas totales aparentes calculadas de acuerdo al IE IEEE112 e IE IEC60034-2-1. Autor: Fuente.	60
Tabla 17: Pérdidas residuales del motor calculadas de acuerdo al IE IEEE112 e IE IEC60034-2-1. Autor: Fuente.....	63
Tabla 18: Metodología para la evaluación de eficiencia energética en motores de jaula de ardilla validada en simulación a partir las normas IEEE112, IEC60034-2-1 e IEEE1459-2010. Fuente: Autor.	68
Tabla 19: Características obtenidas del motor Siemens ILA7 090-2YC60. Fuente: (Onofre A. Morfin1, 2012)	71
Tabla 20: Relación de resultados con torque de 19 Nm del sistema de fuente de distorsión armónica simulada. *Únicamente este valor tiene por referente el método tradicional – Simulación. Fuente: Autor.....	75
Tabla 21: Resumen de las pruebas que solicita la norma IEEE112 y su aplicación dependiendo del método. Igualmente muestra los tipos de motores a los que se puede aplicar cada método según la misma norma técnica. Fuente: Autor.....	80
Tabla 22: Resumen de los procedimientos aplicados en cada método de la norma IEEE112. Fuente: Autor .	81
Tabla 23: IE IEEE112 - Método B. Datos tomados durante la prueba con carga en el laboratorio de la USTA del sistema del motor de jaula de ardilla (Festo, (8221-00)) . Fuente: Autor.....	82
Tabla 24: IE IEEE112 - Método B Cálculos de potencias, pérdidas y correcciones en la prueba con carga en el laboratorio de la USTA del sistema del motor de jaula de ardilla (Festo, (8221-00)). Fuente: Autor	83
Tabla 25: Datos tomados durante la prueba sin carga o al vacío, del sistema del motor de jaula de ardilla (Festo, (8221-00)). Fuente: Autor	84

Tabla 26: Cálculos de potencias, pérdidas y correcciones de los datos obtenidos del motor de jaula de ardilla Lab Volt 8221-00 durante la prueba al vacío. Fuente: Autor.....	85
Tabla 27: Norma IEC60034-2-1, Método Eh-star. Datos tomados durante la prueba con carga en el laboratorio de la USTA del sistema del motor de jaula de ardilla (Festo, (8221-00)). Fuente: Autor	86
Tabla 28: Norma IEC60034-2-1 Pérdidas residuales a partir del ensayo con resistencia Eh-Star. Fuente: Autor	87
Tabla 29: Norma IEC60034-2-1 Pérdidas residuales a partir de las pérdidas asignadas. Fuente: Autor.	88
Tabla 30: Valores de tasa de distorsión armónica calculado en la simulación del sistema trifásico cuya fuente tiene una distorsión armónica de quinto y séptimo orden. Fuente: Autor	89
Tabla 31: Potencias de entrada al motor (Festo, (8221-00)) calculado en la simulación del sistema trifásico cuya fuente es balanceada. Fuente: Autor	90
Tabla 32: Resultado de la simulación IEEE1459 de las potencias de entrada de motor de jaula de ardilla. Fuente: Autor.....	91
Tabla 33: Cálculos de potencias, pérdidas, correcciones y eficiencia en la prueba con carga simulado de la metodología propuesta en base a la IEEE1459 más las pérdidas. Eficiencia por pérdidas se refiere a la calculada usando el método B del IE IEEE112. La columna Eficiencia por pérdidas residuales asumidas, de acuerdo al método De pérdidas PLL por pérdidas asignadas del IE IEC60034-2-1 (Sección 3.3.3.5.2.1) Fuente: Autor.....	92
Tabla 34: Espectro por color de precisión y exactitud del total de los valores de eficiencia determinada por el método tradicional, método aplicando el IE IEEE1459, método B de IE IEEE112, método Reh-star de IE IEC60034-2-1 y método propuesto aplicando el IE IEEE1459 más pérdidas del motor. (Measures, 2012) Fuente: Autor.....	93
Tabla 35: Cálculos de valores complejos de voltajes y corrientes del sistema para aplicar el método Eh-star de IE IEEE112-2-1. Fuente: Autor.....	94
Tabla 36: Metodología para la evaluación de eficiencia energética en motores de jaula de ardilla para aplicar en un laboratorio real a partir las normas IEEE112, IEC60034-2-1 e IEEE1459-2010. Fuente: Autor.	98

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Consumo de energía eléctrica en Colombia 2013. Fuente: (Valencia, 2016).	14
Ilustración 2: Diagrama de flujo de potencia de un motor CA trifásico. Fuente: (Chapman, 2012).....	19
Ilustración 3: Ciclo de histéresis de un material ferromagnético. Fuente: (Chapman, 2012)	20
Ilustración 4: Diagrama de bloque de la prueba con carga en la estación de laboratorio. Fuente: Autor.....	22
Ilustración 5: Diagrama de bloque de la prueba en vacío en la estación de laboratorio. Fuente: Autor.....	22
Ilustración 6: Circuito equivalente de un motor de inducción asíncrona. Fuente: (Chapman, 2012)	35
Ilustración 7: Ensayo mecánico único en oposición de la norma IEC2464-1-2. Fuente (Galindo, 2010).....	39
Ilustración 8: Curva obtenida para hallar las pérdidas residuales PLL a partir de las pérdidas asignadas. (IEC, 2007)	42
Ilustración 9: Circuito equivalente de una máquina trifásica. Fuente: (IEC, 2007)	43
Ilustración 10: Circuito diseñado para agregar la resistencia Eh-star de la norma IEC60034-2-1 en la prueba con carga. Fuente: (Galindo, 2010).....	45
Ilustración 11: Flujograma generalizado de las pruebas realizadas en laboratorio de acuerdo al procedimiento de la norma IEEE112 método B y la norma IEC60034-2-1. Fuente: Autor.	51
Ilustración 12: Montaje del motor de jaula de ardilla del laboratorio de la USTA para la prueba en vacío de acuerdo al esquema de la Ilustración 5. Fuente: Autor.	53
Ilustración 13: Montaje del motor de jaula de ardilla del laboratorio de la USTA para la prueba con carga. Fuente: Autor.	53
Ilustración 14: Análisis porcentual de la eficiencia del motor según la carga, al aplicar la norma IEEE112: Fuente: Autor.....	54
Ilustración 15: Esquema del montaje agregando la resistencia Eh-star de la norma IEC60034-2-1 en la prueba con carga. Fuente: Autor.	55
Ilustración 16: Diagrama fasorial del circuito desbalanceado de la prueba Rh-stat con secuencia positiva. Fuente: Autor.....	55
Ilustración 17: Diagrama fasorial del circuito desbalanceado de la prueba Rh-stat con secuencia negativa. Fuente: Autoría propia.	55
Ilustración 18: Esquema del montaje agregando la resistencia Eh-star de la norma IEC60034-2-1 en la prueba al vacío. Fuente: Autor.....	56
Ilustración 19: Evidencia fotográfica del momento en que se varía el voltaje durante la prueba con la resistencia Eh-star de la norma IEC60034-2-1 en la prueba con carga. Fuente: Autor.	56
Ilustración 20: Análisis porcentual de la eficiencia del motor según la carga, al aplicar la norma IEC60034-2-1. Fuente: Autor.....	57
Ilustración 21: Distribución de pérdidas aparentes del motor de jaula de ardilla en máxima eficiencia 98% Método B de la norma IEEE112. Fuente: Autor.	57
Ilustración 22: Distribución de pérdidas totales del motor de jaula de ardilla durante la prueba R-eh de la norma IEC60034-2-1. Eficiencia máxima 69.04%. Fuente: Autor	58
Ilustración 23: (Pérdidas totales -pérdidas de Estator) Vs. Voltaje de entrada al cuadrado aplicando el método de EI IEEE112 en la prueba al vacío. Fuente: Autor	58
Ilustración 24: (Pérdidas totales -pérdidas de Estator) Vs. Voltaje de entrada al cuadrado, aplicando el método de IE IEC60034-2-1 en la prueba al vacío. Fuente: Autor.....	58
Ilustración 25: Pérdidas en el núcleo respecto a la variación del voltaje de entrada del motor de la prueba al vacío. Fuente: Autor	59
Ilustración 26: Relación entre la potencia de entrada y las pérdidas aparentes del motor al aplicar el método IEEE112 en la prueba con carga. Fuente: Autor	60
Ilustración 27: Relación entre la potencia de entrada y las pérdidas aparentes del motor al aplicar el método de la resistencia Rh-stat de IE IEC60034-2-1. Fuente: Autor.	60

Ilustración 28: Análisis de regresión lineal de las pérdidas residuales respecto al par del motor al cuadrado. Fuente: Autor.....	61
Ilustración 29: Análisis de regresión lineal de las pérdidas residuales respecto al par del motor al cuadrado. Fuente: Autor.....	61
Ilustración 30: Análisis de regresión lineal de las pérdidas residuales respecto a la relación de las Corrientes de secuencia negativa con la corriente de prueba. Fuente: Autor.....	62
Ilustración 31: Linealización de las pérdidas residuales totales aplicando el método B de la norma IEEE112 y los métodos a partir de las pérdidas asignadas y a partir de la prueba Eh Star de la norma IEC60034-2-1. Fuente: Autor.....	63
Ilustración 32: Diagrama de bloques creado en simulink que representa un sistema trifásico del motor síncrono Lab Volt 8221-00. Fuente: Autor.....	69
Ilustración 33: Parámetros de la fuente de voltaje trifásica configurada con los armónicos 5 y 7. Fuente: Mathworks, power_3phsignalseq	70
Ilustración 34: Parámetros de la máquina asíncrona configurada con rotor de jaula de ardilla. Fuente: (LabVolt_Series).....	70
Ilustración 35: Diagrama de bloques de los cálculos de corrientes y voltajes fundamentales potencia aparente, activa, reactiva instantánea y eficiencia de IE IEEE1459 para aplicar la nueva metodología propuesta. Fuente: Autor	72
Ilustración 36: Simulación del voltaje a través del tiempo de la fuente Three-Phase Programmable Voltage distorsionada con componentes armónicos de 5 ^{to} y 7 ^{mo} orden. Fuente: Autor.....	73
Ilustración 37: Comparación de la eficiencia aparente obtenida de la simulación del sistema balanceado vs. Sistema trifásico con la fuente distorsionada por armónicos de orden 5 y 7 en la fuente. Cálculos de acuerdo a la norma IEEE1459. Fuente: Autor	73
Ilustración 38: Gráfica general comparativa de la eficiencia calculada por diferentes métodos. Fuente: Autor	74
Ilustración 39: Diagrama representativo de la exactitud y precisión de la eficiencia calculada por cada método visto a lo largo del documento. *Revisar Nota. Fuente: Autor.	76

1. Introducción

La eficiencia energética actualmente es un tema de suma importancia a nivel mundial y por tanto a nivel nacional, debido al impacto ambiental, económico y productivo que está generando el aumento de demanda energética anual, se espera un aumento cercano al 52% la demanda interna de energía eléctrica del país a partir del 2017 hasta el 2022 (UPME, Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017-2022, 2016). Esto a causa del uso constante y desmedido de las máquinas en el sector industrial.

Por otra parte, se selecciona el motor de jaula de ardilla debido a que es el tipo de motor más usado en la industria por su bajo valor adquisitivo en el mercado (Bojacá, 2010); considerando, además, que los motores constituyen el principal uso de la energía final con un 76% de participación en el sector industrial (UPME, Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017-2022, 2016).

Dado todo lo anterior y rescatando que la eficiencia energética, desde el punto de vista técnico, se considera una metodología orientada al uso racional de la energía, es muy importante contar con metodologías claras y precisas que sirvan como herramientas útiles a los investigadores que buscan construir nuevas estrategias de mejoras para este fin.

“La metodología describe, valida, y en cierto modo, prescribe un conjunto de reglas (...) que el investigador debe considerar para construir y validar conocimientos científicos”

(Klimovsky, 1998, citado por Yuni, 2006)

En este sentido, diferentes países del mundo han establecido normas y reglamentos técnicos de eficiencia energética especializados en la evaluación de los índices de pérdidas o eficacias de los motores eléctricos trifásicos, de las cuales, el estándar IEEE112 y en Europa el estándar IEC 60034 2- son las normas mayormente aceptadas a nivel mundial.

Razón por la cual este proyecto presenta un análisis comparativo de las técnicas utilizadas en ambas normas. A partir del cual se encuentra que, aunque se basan en el cálculo de las pérdidas de energía del motor, las citadas normas no tienen en cuenta la mayor cantidad de factores que pueden afectar la potencia de entrada y por tanto a la eficiencia final del sistema trifásico completo del motor.

Es por ello, que en complemento se consulta la norma IEEE1459 -2010 ya que presenta una definición matemática de la potencia aparente más completa por considerar dichos factores, como por ejemplo los armónicos de la fuente o bajo condiciones no sinusoidales de la onda de voltaje de entrada del sistema.

Finalmente, se agregan estos cálculos de la potencia aparente de entrada, a los métodos B y R_{eh} probados en laboratorio de la USTA establecidos por las normas IEEE112 e IEC6034 2-1 respectivamente. Y de esta forma se propone una nueva metodología basada en el conjunto de normativas consultadas que se finalmente se evalúa en una simulación de Matlab, y que también se deja por escrito los pasos para probarla en laboratorio en trabajos futuros.

1.1. Objetivos

1.1.1. *Objetivo General*

- Analizar los métodos para la determinación de la eficiencia energética de motores de inducción de jaula de ardilla basándose en las normativas IEEE112 e IE IEC 60034 2-1.

1.1.2. *Objetivos Específicos*

- Revisar las diferentes metodologías para evaluación de eficiencia energética existentes en las normativas IEEE112 e IE IEC 60034 2-1.
- Documentar, aplicar y comparar el método B de la norma IEEE112 con el método directo de la norma IEC 60034 2-1 sobre un motor de inducción con rotor de jaula de ardilla del laboratorio de la universidad Santo Tomás.
- Diseñar una metodología para la evaluación de eficiencia energética en motor de jaula de ardilla con base en el IE IEEE112, IE IEC60034-2-1 e IE IEEE1459.
- Validar el modelo propuesto en motor de jaula de ardilla.

1.2. Justificación

El plan de eficiencia energética que presenta el gobierno colombiano (UPM, 2015), resalta que es necesario estudiar las metodologías usadas para la clasificación, evaluación y validación de los parámetros energéticos toda vez que son la base para adquirir y revelar indicadores más reales, confiables y parametrizables. De acuerdo a los programas de Uso Racional de energía (URE) y en aras de difundir y mejorar las estrategias y metodologías de evaluación de eficiencia energética existentes en el sector industrial de Colombia (Bogotá, 2001) y (Secretaría General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 1994), se presenta este proyecto.

Ahora bien, de acuerdo al plan de eficacia energética 2017-2022 de UPME, el costo de consumo anual del sector industrial, es el segundo más elevado por pertenecer a usuarios regulados. En este punto, es importante identificar los elementos que generen mayor impacto energético en la cadena productiva, como lo declara el artículo publicado por EI IEEE “Technical and economical considerations on super high-efficiency three-phase motors”, el principal consumo de energía eléctrica recae en el tren de potencia, es decir: convertidor, reductor de velocidad y motor, a su vez, este último demanda el 176% de la energía final del sector industrial en el país (Ilustración 1). Por lo tanto, es claro que de las máquinas eléctricas a las que se puede aplicar la metodología de eficiencia energética, el motor, se postula como el candidato más significativo y trascendental en la industria sobre el que se dirigirá este proyecto.

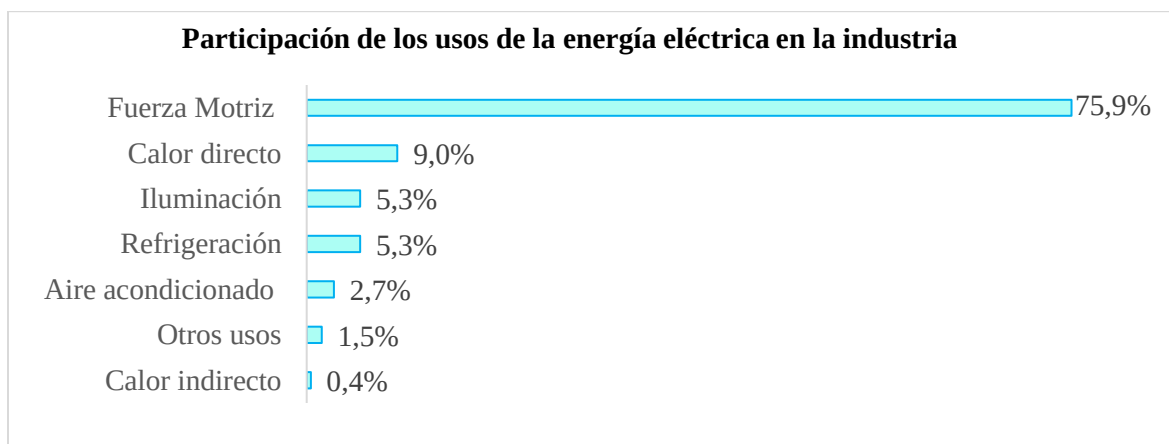


Ilustración 1: Participación de los usos de la energía eléctrica en la industria. Fuente: (UPME, Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017-2022, 2016)

Igualmente, en cuanto a costo de consumo anual el sector industrial es el más elevado hasta marzo de 2016 por pertenecer a usuarios regulados. En este punto, es importante identificar los elementos que generen mayor impacto energético en la cadena productiva, como lo declara el artículo publicado por EI IEEE “Technical and economical considerations on super high-efficiency three-phase motors”, el principal consumo de energía eléctrica recae en el tren de potencia, es decir: convertidor, reductor de velocidad y motor, a su vez, este último demanda el 46% de la energía mundial. Por lo tanto, es claro que de las máquinas eléctricas a las que se puede aplicar la metodología de eficiencia energética, el motor, es el elemento que generaría más impacto en la eficiencia total del sistema.

En este sentido, diferentes países del mundo han establecido normas y reglamentos técnicos de eficiencia energética especializados en la evaluación de los índices de pérdidas o eficacia de los motores eléctricos trifásicos, de las cuales, las normas mayormente aceptadas son EI IEEE112 y en Europa IE IEC 60034 2-1 (Chapman, 2012) en el capítulo 6, Tendencias en el diseño de motores de inducción.

Por otra parte, a pesar que las normas IEEE112 y IEC60034-2-1 tiene en cuenta las pérdidas de energía que se presentan en una máquina asíncrona debido a factores como lo desgastes, la resistencia al viento, temperatura, entre otros. No tiene en cuenta los efectos de un sistema con condiciones de voltaje no sinusoidal, causados por factores eléctricos externos como pueden ser los armónicos presentes en la fuente de alimentación del motor, o que un sistema trifásico real por lo general presenta algún tipo de distorsión en la fuente. Con esto en mente, se consulta la norma IEEE1459 para agregar el cálculo de la potencia de entrada al sistema que presenta dicho estándar a la metodología que se propone en este documento para la evaluación de eficiencia energética en motores de inducción eléctrica.

2. Panorama actual de eficiencia energética en el mundo

El concepto de eficiencia energética se refiere al funcionamiento del sistema energético teniendo en cuenta el carácter renovable de las fuentes que utiliza, y la maximización de producción reduciendo la energía utilizada, este concepto se ha evaluado a través de normatividad nacional e internacional, de las cuales resalta primero, la norma (IEEE, IEEE112 Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, 2004) de EI IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). En segundo lugar, pero no menos importante, del portafolio de IE IEC (International Electrotechnical) la norma (IEC, IEC 60034: International standard Rotating electrical machines, 2004), de la cual la parte 2-1 indica las metodologías de ensayo de eficacia energética, así como la parte 30 para el etiquetado de motores según la clasificación de los niveles de eficiencia.

En Europa, India, China, Australia y Nueva Zelanda rigió por décadas, la norma IEC 60034-2 que establece los métodos normalizados para la determinación de las pérdidas y del rendimiento a partir de ensayos, excepto las máquinas para vehículos de tracción.

En Norteamérica y los países con red eléctrica de 60hz, la norma IEEE-112 determina los procesos y requisitos mínimos de eficiencia en motores eléctricos trifásicos. Por su éxito, organizaciones como NEMA e IEC la tomaron como referencia para actualizar algunas normas.

Por parte de IE IEC en noviembre de 2007 integra actualizaciones basadas en EI IEEE-112 y las publica en la norma IEC 60034 2-1, para maquinas eléctricas rotativas. Un año después, en conformidad con normas estadounidenses y hasta brasileras, se publica la parte 30 de la norma IEC 60034.

Para efectos de pruebas y medidas del consumo de energía en motores eléctricos, cada país adopta normas y reglamentos técnicos basados en aquellos que son altamente aceptados en el mundo científico. Por ejemplo, en América latina la norma UNE-EN 60034-2-1:2014: Métodos normalizados para la determinación de las pérdidas y del rendimiento a partir de ensayos, se basa en su homóloga internacional EN 60034-2-1:2014 (Adaptación de la norma IEC60034-2-1).

Como lo publica el artículo “Normas de Eficiencia Energética de Motores de Inducción, ¿Está Preparada Latinoamérica?” (Ramírez-Echavarría2, 2013), estos son algunos programas e instituciones en América latina en pro de la eficiencia y ahorro energético: PUREE y PAyEE en Argentina, PROCEL en Brasil, PROURE y CONOCE en Colombia, PRONACE en Costa Rica, 4ECHILE en Chile, CONAE y FIDE en México, PAE en Perú, PAEC en Cuba, PESIC en Honduras y PEE en Uruguay.

En Colombia, han cobrado gran importancia proyectos en pro del uso racional de energía y la eficacia energética para un desarrollo sostenible y se han pluralizado a través de instituciones como Colciencias y UPME que apoyan económicamente su investigación e implementación. Entre ellos surgen tecnologías de recuperación y aplicación de diferentes energías renovables, como la evaluación energética en torres de enfriamiento (energías, 2010), y proyectos dedicados a corregir factores que mejoran la eficiencia energética de partes especializadas de las máquinas, como en los transformadores eléctricos (energías, Eficiencia energética en transformadores eléctricos, 2010) y motores eléctricos (energías., 2010).

Aplicaciones de dichas tecnologías y estrategias de eficiencia energética se han desarrollado en tesis de la Universidad Santo Tomás, como las siguientes:

Evaluación y simulación del sistema energético del edificio de la sede central de la universidad santo Tomás, Bogotá, Colombia (PEDRAZA, 2012)

El fin de este trabajo fue realizar los planos eléctricos de la USTA sede central, y posteriormente realizar un estudio energético para evaluar la sostenibilidad del sistema eléctrico y estimar los índices de eficiencia de energía. Finalmente, el estudio concluye en una propuesta de un sistema de monitoreo y control de los índices energéticos en lugares puntuales del sistema de distribución eléctrica de la edificación.

Diseño e implementación de servicios de medición de consumo energético en máquinas de inyección de plásticos (DÍAZ, 2014)

Un proyecto de especialización en instrumentación electrónica cuyo objetivo general, es implementar un servicio de medición de consumo energético en máquinas de inyección de plásticos. Para lo cual realiza un estudio económico y técnico de los procesos

Estudio de eficiencia energética en iluminación y uso racional de energía, mediante la implementación de estrategias de sistemas de control en áreas de oficina (MORENO, E 2014)

El proyecto se ejecutó en la compañía Diebold Colombia S.A., la prioridad era controlar el consumo energético de la tecnología LED (Light-Emitting Diode o Diodo Emisor de Luz) en áreas de trabajo. Al término del estudio, se propone un plan estratégico a nivel energético en la iluminación, controlando su intensidad lumínica además del encendido automático al momento de entrar al lugar. Así que este proyecto muestra la implementación de tecnologías como un método para la evaluación de la eficiencia energética en la iluminación.

Análisis comparativo de las normas IEC60034-2-1 y IEEE112 para determinar la eficiencia de motores de inducción en laboratorio (RAMÍREZ, 2010)

Este proyecto, como lo indica su título hace una comparación entre ambas normas internacionales. Resume las características y las principales diferencias entre los métodos 8.2.2.5.1 y 8.2.2.5.3 de la norma IEC60034-2-1 respecto a los métodos B y E1 de EI IEEE112; finalmente, crea un archivo Excel para determinar la eficiencia en motores de inducción.

Evaluación de los métodos para la determinación de las pérdidas adicionales en los motores de inducción (Camilo Andrés Cortés, 2008)

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar una metodología para la realización de pruebas tendientes a determinar pérdidas en motores de inducción con énfasis en la determinación de las pérdidas adicionales. Para lo cual implementa únicamente el método Eh-star y método de rotación inversa de la norma IEC60034-2-1, finalmente presenta la eficiencia total de motores de 2, 4 y 6 polos.

Metodología de eficiencia energética en la industria (Metodología de eficiencia energética en la industria)

Un proyecto para el Programa de Eficiencia Energética del Ministerio de Economía de la República de El Salvador Banco Interamericano de 2011. En la cual se presenta una guía numerada para realizar auditorías energéticas además de listas de chequeos de parámetros energéticos aplicables a la mayoría de sectores industriales, dichas auditorias se hacen con el fin de evaluar el desempeño de los equipos y sistemas consumidores de energía.

Energy efficiency analysis in nonlinear triphasic systems using ieee 1459-2010 (Forero-García, 2021)

Este trabajo investigativo presenta una metodología para medir la eficiencia energética de un inversor trifásico tipo puente según los parámetros del IE IEEE 1459-2010. El resultado de la metodología demostró que el valor de la eficiencia se puede precisar con más exactitud con la metodología basada en el IE IEEE 1459 con respecto a la metodología tradicional.

3. Marco Teórico

Este capítulo presenta en primer lugar los conceptos básicos sobre eficiencia energética en motores de jaula de ardilla (Sección 3.1 página 19). En seguida, desglosa en detalle las normativas IEEE112 (Sección 3.2 página 21) e IEC60034 (Sección 3.3 página 38) y finalmente, presenta la norma IEEE1459 (Sección 3.4 página 46), la cual se usará como base para la creación de una metodología para la evaluación de eficiencia energética en motores con rotor de jaula de ardilla.

3.1. Eficiencia Energética

La eficiencia energética, desde el punto de vista técnico, se considera una metodología orientada al uso racional de la energía, para lo cual se debe tener en cuenta el carácter renovable de la fuente, y a partir de su naturaleza desarrollar estrategias que permitan optimizar o reutilizar elementos de la cadena energética.

En forma general la eficiencia es la diferencia entre la potencia de salida con respecto a la de entrada, revisar la ecuación 1,

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ de\ salida}{Potencia\ de\ entrada} [Ecuación\ 1]$$

3.1.1. Eficiencia energética aplicada a motores

Aplicado a motores se utiliza la ecuación 2,

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ de\ entrada - Pérdidas}{Potencia\ de\ entrada} [Ecuación\ 2]$$

A menos que se especifique lo contrario, la eficiencia se determinará para la tensión y la frecuencia nominales. La eficiencia de un motor se ve directamente afectada por las pérdidas que se generan al accionarlo como lo muestra la Ilustración 2,

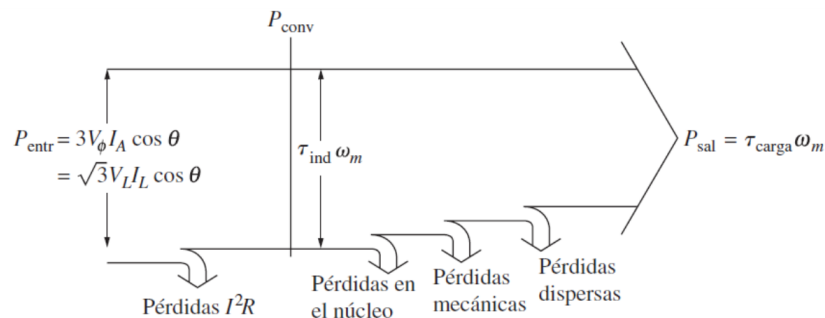


Ilustración 2: Diagrama de flujo de potencia de un motor CA trifásico. Fuente: (Chapman, 2012)

3.1.1.1. Pérdidas en el estator

Cuando el motor está en funcionamiento parte de la potencia que es absorbida de la red eléctrica es disipada por el devanado de la resistencia del estator, en consecuencia, existen pérdidas tanto magnéticas como eléctricas.

Pérdidas magnéticas: se deben al fenómeno de histéresis que presenta un material ferromagnético sobre el cual ha estado actuando un campo magnético. En los motores, transformadores y generadores, el ciclo de histéresis en el núcleo debe ser lo más estrecho y difícilmente saturable, de lo contrario se traduce en pérdidas.

3.1.1.2. Pérdidas en el rotor

En el rotor también se generan tanto pérdidas magnéticas, que se pueden considerar independientes del índice de carga, así como pérdidas eléctricas o pérdidas por efecto Joule, en donde la corriente al cuadrado que circula por las bobinas, tiende a ascender proporcional a la carga del motor. Se calculan de la misma forma, usando las propiedades correspondientes del material, la resistencia del rotor y la corriente que fluye en las barras conductoras del mismo. El lugar en donde las pérdidas presentan mayor aumento es en el rotor de la máquina.

3.1.1.3. Pérdidas de ventilación y fricción

También llamadas pérdidas mecánicas, son causadas por el viento que se interpone en el movimiento de las partes móviles del motor, y la fricción entre los cojinetes.

3.1.1.4. Pérdidas en el núcleo

Estas pérdidas son causadas por el ciclo de histéresis, donde el núcleo sufre un fenómeno llamado magnetismo remanente, en el que el material electromagnético no vuelve a su estado original, después de variar cíclicamente la fuerza magnética aplicada para su excitación.

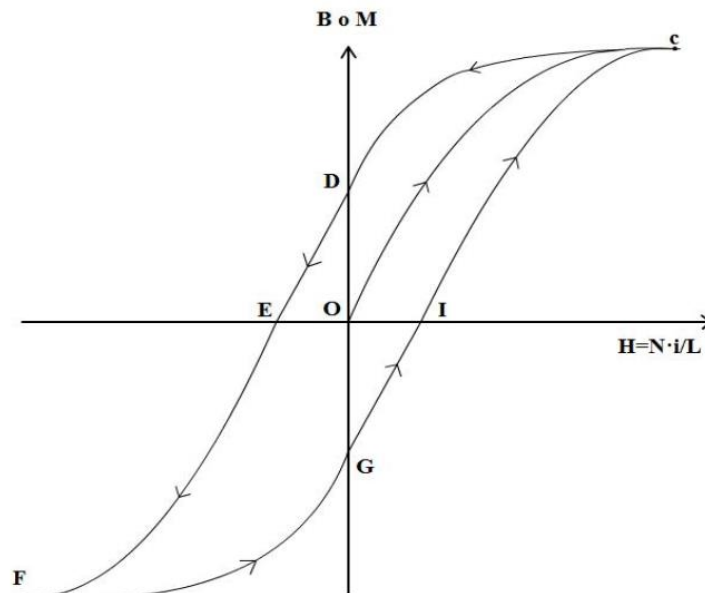


Ilustración 3: Ciclo de histéresis de un material ferromagnético. Fuente: (Chapman, 2012)

3.2. IEEE112 Procedimiento de Prueba Estándar para Generadores y Motores de Inducción Polifásicos

La norma IEEE112 ofrece varios métodos con los cuales se puede medir la eficiencia de un motor.

Método A	Entrada-Salida
Método B	Entrada-Salida con segregación de pérdida
Método B1	Entrada -Salida con segregación de pérdidas y asumiendo temperatura
Método C	Máquinas duplicadas
Método E o E1	Medida de la energía eléctrica con segregación de pérdida
Método F o F1	Circuito equivalente
Método C/F, E/F, o E1/F1	Circuito equivalente calibrado con un punto de carga

Tabla 1: Lista de métodos para la determinación de la eficiencia energética de norma IEEE112.

Para la comprensión de la estructura general de la norma IEEE112 se crean las Tabla 21 y Tabla 22 adjuntas en el **Anexo A** y **Anexo B**.

Todos los métodos tienen en común una serie de pruebas básicas aplicadas al motor de inducción, que se explicarán a continuación. Se debe aclarar, que en cada método de la norma varía la forma en que se miden y/o se calculan las pérdidas residuales.

3.2.1. Procedimientos Básicos

3.2.1.1. Resistencia en Frio

Medir la resistencia de la bobina del terminal a terminal con la máquina conectada en la configuración que se utilizará en la prueba de eficacia. Aplicarlo para todas las combinaciones, es decir, T1-T2, T2-T3, y T3-T1. Finalmente, medir y registrar la temperatura ambiente. Tener en cuenta que la temperatura ambiente se mide utilizando el procedimiento de IEEE Std. 119-1974.

3.2.1.2. Prueba de temperatura nominal

La prueba de temperatura nominal se realiza cuando la máquina de inducción eléctrica se carga como motor o generador. No todos los métodos de EI IEEE112 solicitan llevarla a cabo. La eficiencia de la máquina, en todas las cargas, se determinará en función de la máquina a la temperatura específica, para lo cual se puede usar los siguientes métodos:

- **Método_a:** La temperatura especificada es el aumento medido de la temperatura por la resistencia de una prueba clasificada de la temperatura de la carga más 25 ° c. La carga nominal es la clasificación identificada en la placa de identificación en un factor de servicio de 1,0.
- **Método_b:** Aplicar el método_a, de la prueba de temperatura en una máquina con las mismas condiciones de la original.

3.2.1.3. Prueba con carga

Acoplar al motor un dinamómetro, se debe comenzar con el valor de carga más alto sin exceder el 150 % de carga y muévase en orden descendente hasta el 25% de carga.

En cada punto de carga se debe registrar los valores de potencia eléctrica, corriente, voltaje, frecuencia, velocidad o deslizamiento, torque, temperatura de bobinado del estator, resistencia del bobinado del estator y la temperatura ambiente.

Para el método B de la prueba de la eficacia, la temperatura del devanado del estator estará dentro de 10 ° c de la lectura más caliente de la temperatura registrada durante la prueba clasificada de la temperatura de la carga en esto o la máquina duplicada antes del comienzo de los datos de la grabación para esta prueba.

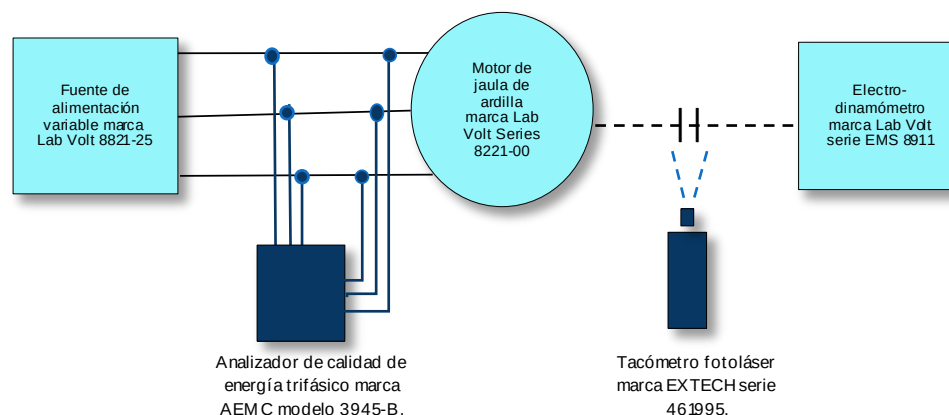


Ilustración 4: Diagrama de bloque de la prueba con carga en la estación de laboratorio. Fuente: Autor.

3.2.1.4. Prueba sin carga o al vacío

Esta prueba se realiza conectando la máquina como un motor a tensión nominal y frecuencia sin carga. Medir la temperatura, voltaje, corriente y energía de entrada a frecuencia nominal y a tensiones variables.

Se puede considerar que la estabilización se ha producido siempre que la potencia de entrada sin carga no varíe más del 3% entre dos lecturas sucesivas con el mismo voltaje a intervalos de media hora. Esta prueba de estabilización de pérdida de rodamiento puede no ser necesaria si se ha realizado una prueba de temperatura antes de la prueba sin carga.

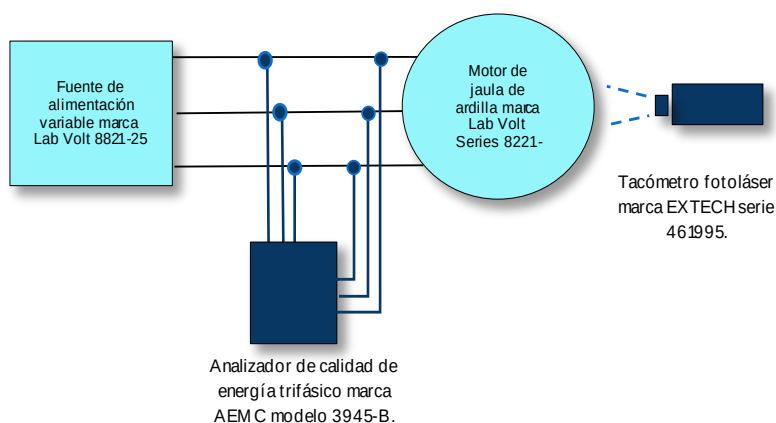


Ilustración 5: Diagrama de bloque de la prueba en vacío en la estación de laboratorio. Fuente: Autor.

3.2.1.5. Pérdidas por fricción y viento

Para determinar la pérdida de fricción y de viento, reste la pérdida del estator I^2R (a la temperatura de prueba) de las pérdidas totales (es decir, la potencia de entrada) en cada uno de los puntos de tensión de prueba y trace la curva de potencia resultante versus voltaje, extendiendo la curva a tensión cero.

La interceptación con el eje de tensión cero es la fricción y la pérdida de viento. Esta interceptación se puede determinar con mayor precisión si la energía de entrada menos la pérdida del estator I^2R se traza contra el voltaje cuadrado para los valores en el rango de voltaje inferior.

La pérdida de fricción y de viento también se puede determinar realizando un análisis de regresión lineal utilizando tres o más puntos inferiores de la curva de potencia versus tensión cuadrada.

3.2.1.6. Pérdidas del núcleo

Para cada voltaje de prueba calcular las pérdidas del núcleo con la siguiente ecuación:

$$P_h = \text{Energía de entrada} - \text{Pérdidas del estator} - \text{Pérdidas de fricción y viento}$$

[Ecuación 3]

Una trama de pérdida del núcleo versus tensión puede ser construida para su uso en la determinación de la pérdida del núcleo a cualquier voltaje deseado.

3.2.1.7. Pérdidas del estator

Calcular las pérdidas del estator con la resistencia de la bobina corregida a la temperatura de prueba a partir de la Ecuación 4,

$$P_{SIR} = 1.5I^2R \text{ [Ecuación 4]}$$

I: Corriente de terminal de línea, en amperios.

R: Resistencia entre dos terminales de línea cualquiera, corregida por la temperatura ambiente. En ohm.

Este cálculo de las pérdidas de estator I^2R para cada punto de carga se realizará utilizando la resistencia media de bobinado.

3.2.1.8. Pérdidas del rotor

Este cálculo está basado en la velocidad o deslizamiento actual por cada punto y no es necesario ajustarlo.

Las pérdidas del rotor se calculan como se indica en la Ecuación 5, incluidas las pérdidas por el contacto con escobillas de máquinas de rotor bobinado se determinan a partir del deslizamiento,

$$\text{Pérdidas en el rotor del motor} = (\text{Potencia IN en el estator} - \text{Pérdidas en el estator} - \text{Pérdidas en el núcleo}) \times s \text{ [Ecuación 5]}$$

Donde,

S: Deslizamiento en p.u. (Por unidad) con velocidad síncrona como velocidad base.

$$s = \frac{\text{velocidad sincrona} + \text{Velocidad medida (r/min)}}{\text{Velocidad sincrona (r/min)}} \quad [\text{Ecuación 6}]$$

3.2.1.9. Pérdidas totales aparentes

La pérdida total aparente sin tener en cuenta las pérdidas, se calculan por separado para cada punto de carga del motor restando la potencia de salida de la potencia de entrada medidas en watts.

Para un generador, la potencia de salida es igual a la potencia de entrada eléctrica durante la prueba de carga y la potencia de entrada en el eje es igual a la potencia de entrada de la potencia eléctrica de prueba más las pérdidas anteriores.

3.2.1.10. Pérdidas por carga parásita

Restar las pérdidas del núcleo, fricción y viento, del estator y el rotor de las pérdidas totales.

3.2.1.11. Pérdidas residuales

La norma IEEE112 ofrece métodos directos e indirectos para calcular estas pérdidas. El procedimiento de medición indirecta se usa en los métodos de prueba de eficiencia B, B1, C y C / F. Para calcular las pérdidas residuales se debe restar la suma de las pérdidas totales (estator, núcleo, rotor, viento y rozamiento) de las pérdidas totales aparentes por cada punto de carga.

Utilizar un análisis de regresión lineal basado en la fórmula de las pérdidas parásitas por la carga en función del cuadrado del par o torque de carga. Los resultados del análisis deben ser como se muestra en la ecuación.

$$P_{SL} = A * T^2 + B \quad [\text{Ecuación 7}]$$

P_{SL} : Pérdidas parásitas por la carga, en Watts vs. el cuadrado del torque.

T : Torque, en N-m.

A : Deslizamiento.

B : Es la intercepción con 0 con línea de torque.

Si el deslizamiento es negativo o si el factor de correlación es menor a 0,9. Eliminar el punto erróneo y repetir el análisis de regresión. Si esto incrementa el factor de correlación de 0,9 o más, use la segunda regresión. Si tampoco funciona, o el deslizamiento es negativo, la prueba es insatisfactoria. Se debe averiguar la fuente del error y corregir.

Para otros métodos E1, F1 y E1/F1 se utiliza el procedimiento indirecto donde se asumen las pérdidas residuales a partir de la siguiente tabla:

Valores de la maquina (W)	Pérdidas residuales en carga nominal (%)
1-90	1.8%
91-375	1.5%
376-1850	1.2%

1851 y más	0.9%
------------	------

Tabla 2: Porcentaje de pérdidas residuales asumidos para métodos E1, F1 y E1/F1 de la norma IEEE112.
Fuente: (IEEE, IEEE112 Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, 2004)

3.2.1.12. Corrección de las pérdidas por cargas parásita

Se corrige desplazando la curva para pasar por el origen manteniendo la pendiente original. Revisar la siguiente ecuación,

$$P_{SLC} = A * T^2 \text{ [Ecuación 8]}$$

Donde:

A: Pendiente de P_{SL} vs. T^2 de la curva de aproximación de las pérdidas residuales.

T: Torque, en $N \cdot m$, para cada punto de carga

3.2.1.13. Correcciones por temperatura de las pérdidas del estator

La corrección de las pérdidas del estator P_{SIR} , se calcula por cada punto de carga mediante el promedio de la resistencia corregida a la temperatura específica del estator, revisar la ecuación 9,

$$P_{SIR} = 1.5I^2R = 3R_1 \text{ [Ecuación 9]}$$

Donde:

P_{SIR} : Pérdidas del estator para maquina trifásica. En watts.

I: Es la corriente de terminal de línea en amperios.

R: Es la resistencia entre dos terminales de línea cualquiera, corregida en la temperatura usando la ecuación, En Ohm.

$$R_b = \frac{R_a(t_b+k_1)}{t_a+k_1} \text{ [Ecuación 10]}$$

3.2.1.14. Correcciones por temperatura de las pérdidas del rotor

Las correcciones de las pérdidas del rotor calculada anteriormente en la Pérdidas en el rotor del motor = (Potencia IN en el estator – Pérdidas en el estator – Pérdidas en el núcleo) $\times s$ [Ecuación 5] se realizan en base a la corrección del deslizamiento (S) por temperatura, según lo indica la ecuación 11,

$$S_s = \frac{S_t(t_s+k_1)}{t_t+k_1} \text{ [Ecuación 11]}$$

Donde:

Ss: Deslizamiento en p.u. corregido para la temperatura de estator especificada t_s .

St: Deslizamiento en p.u. medido a la temperatura del devanado del estator t_t .

Ts: Temperatura especificada para cada corrección de resistencia en $^{\circ}C$

tt: Temperatura observada en el devanado del estator durante la prueba de carga en $^{\circ}C$

K1: Es 234.5 para el 100% de conductividad en el cobre IACS, o 225 para el aluminio, para una conductividad del 62%

3.2.1.15. Corrección del total de pérdidas

Suma de todas las pérdidas corregidas (estator, rotor, fricción y viento, núcleo y las pérdidas residuales).

3.2.1.16. Cálculo de la eficiencia

De acuerdo al método B de la norma IEEE112 la eficiencia se calcula con las ecuaciones 1 y 2,

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ de\ salida}{Potencia\ de\ entrada} [Ecuación\ 1]$$

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ de\ entrada - P_{\text{pérdidas}}}{Potencia\ de\ entrada} [Ecuación\ 2]$$

3.2.1.17. Factor de potencia %

Se puede determinar mediante un método indirecto, como lo estipula la ecuación 12:

$$PF (\%) = \frac{P}{\sqrt{3} * VI} [Ecuación\ 12]$$

Donde:

P: Potencia eléctrica de entrada, en W.

V: Voltaje de entrada de línea a línea, en voltios.

I: Corriente de entrada en amperios.

Por otra parte, cuando se utiliza el método de dos vatímetros para medir la potencia de entrada de las máquinas trifásicas, el factor de potencia en porcentaje, puede comprobarse mediante la ecuación 13,

$$PF (\%) = \frac{100}{\sqrt{1 + 3 \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \right)^2}} [Ecuación\ 13]$$

Donde:

P1: Medida de la potencia de entrada más alta.

P2: Medida de la potencia de entrada más baja.

3.2.2. Método A: Entrada-Salida

El método de entrada-salida debe limitarse a máquinas con clasificaciones inferiores a 1 kW.

3.2.2.1. Realizar la prueba de resistencia en frío como lo especifica el apartado 3.2.1.1 de pruebas básicas de este documento.

3.2.2.2. Realizar la prueba con carga como lo especifica el apartado 3.2.1.3 de pruebas básicas de este documento.

3.2.2.3. Realizar los cálculos tomando como guía el formato 9.2. cálculos formato A2 de 9.3 de la norma IEEE112.

3.2.2.4. Correcciones de la temperatura de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P_C = I_t^2 R_S - I_t^2 R_t [Ecuación\ 14]$$

Donde:

P_C: Es la corrección de potencia necesaria, en W.

- I_t : Es la corriente de línea, durante la prueba en amperios.
 R_t : Es la resistencia media del devanado al apagado, en ohmios.
 R_s : Es R_t corregida a la temperatura específica.

3.2.2.5. Correcciones del deslizamiento (s)

El deslizamiento, en (p.u.) con base en la velocidad síncrona, está directamente relacionado con la resistencia del rotor, por lo cual se puede usar la ecuación:

$$S_s = \frac{S_t(t_s + k_1)}{t_t + k_1} \quad [\text{Ecuación 15}]$$

Donde:

- S_s : Deslizamiento en p.u. corregido para la temperatura de estator especificada t_s .
 S_t : Deslizamiento en p.u. medido a la temperatura del devanado del estator t_t .
 T_s : Temperatura especificada para cada corrección de resistencia en $^{\circ}\text{C}$.
 T_t : Temperatura observada en el devanado del estator durante la prueba de carga en $^{\circ}\text{C}$.

3.2.2.6. De acuerdo a los valores resultantes de la potencia de entrada corregida por temperatura (P_c). Revisar la ecuación 2.

3.2.3. Método B: Entrada-salida con Segregación de Pérdida

Este método se puede aplicar a las máquinas horizontales clasificadas en 1 – 300 kW, también, si la construcción de los cojinetes lo permite, a las máquinas verticales en el rango de 1 – 300 kW y a las máquinas calificadas con un valor superior a 300 KW.

- 3.2.3.1.** Realizar la prueba con carga como lo especifica el apartado 3.2.1.3 de pruebas básicas de este documento.
3.2.3.2. Realizar una prueba de corrección del dinamómetro con el fin de compensar las pérdidas por fricción del cojinete y del acoplamiento del dinamómetro. Esta prueba no es necesaria cuando la carga en la máquina de prueba se mide utilizando un transductor de par en línea con el eje de la máquina ya que las pérdidas de acoplamiento no afectan significativamente la eficiencia.

Para lograrlo se realizarán dos ensayos, Prueba A, mientras está acoplado el motor al dinamómetro se quita la energía eléctrica del dinamómetro y se registran valores de la potencia de entrada eléctrica, voltaje, corriente, deslizamiento o velocidad, par y bobinado del estator, así como la resistencia y la temperatura del devanado del estator.

A continuación, la máquina se desacopla del dinamómetro y se toman los datos del motor sin carga a voltaje nominal o Prueba B, estos datos también pueden ser remplazados por los que se toman durante la prueba sin carga o en vacío. La corrección del dinamómetro en $\text{N} \cdot \text{m}$, se puede determinar a partir de la ecuación 16 que se muestra a continuación:

$$P = \frac{2\pi n_t T}{60} = \frac{n_t T}{k_2} \quad [\text{Ecuación 16}]$$

Donde:

- P : Potencia del eje, en watts (W),
 n_t : Velocidad medida o la velocidad calculada utilizando el deslizamiento medido, en r /min,
 k_2 : Es 9.549 para el par en Newton metros ($\text{N} \cdot \text{m}$)

T: Es el par, en Newton metro (Nm). La corrección del torque por temperatura se realiza en base a la ecuación 17,

$$T = T_t \pm T_D \text{ [Ecuación 17]}$$

Donde:

T_t: Par medido en el eje de la máquina, en Nm,

T_D: Corrección del dinamómetro en Nm, que a su vez se calcula a partir de la [Ecuación 18], en N · m.

$$T_D = k_2 * \frac{P_A - P_B}{n_A} - T_A \text{ [Ecuación 18]}$$

Donde:

P_A: Potencia en W (Prueba A).

$$P_A = (P_{inA} - P_h) * (1 - S_A) \text{ [Ecuación 19]}$$

P_{inB}: Potencia en W, (Prueba B).

$$P_B = (P_{inB} - P_{SIRB} - P_h) \text{ [Ecuación 20]}$$

Teniendo en cuenta las siguientes convenciones:

P_{inA}: Potencia de entrada en W (Prueba A).

P_{inB}: Potencia de entrada en Watts (Prueba B).

P_{SIRA}: Es la pérdida de I²R del estator, en W (Prueba A).

S_A: Deslizamiento, en p.u. (Prueba A).

T_A: Es el par, en N · m, registrado por el dinamómetro, (Prueba A).

N_A: Velocidad medida o la velocidad calculada usando el deslizamiento medido, en r / min, (Prueba A).

P_{SIRB}: Pérdida I²R del estator, en W, durante una prueba sin carga a voltaje nominal (Prueba B).

P_h: Pérdida del núcleo, en W, durante una prueba sin carga a voltaje nominal.

3.2.3.3. Realizar la prueba al vacío y frecuencia nominal (Sección 3.2.1.4).

3.2.3.4. Realizar el cálculo de las pérdidas del motor y sus respectivas correcciones como lo especifica la sección 3.2.1 de procedimientos básicos.

3.2.3.5. Realizar el cálculo de la eficiencia (Sección 3.2.1.16) y factor de potencia (Sección 3.2.1.17), finalizando con la sumatoria de las caracterizas en cada punto.

3.2.4. Método B1: Entrada-Salida con Segregación de Pérdidas y asumiendo Temperatura

3.2.4.1. Realizar la prueba con carga (Sección 3.2.1.3).

3.2.4.2. Ejecutar la prueba de temperatura nominal (Sección 3.2.1.2).

3.2.4.3. Proceder a realizar una estabilización de pérdida de rodamiento, se puede considerar que la estabilización se ha producido siempre que la entrada de potencia en vacío no varíe en más del 3% entre dos lecturas sucesivas a la misma tensión en intervalos de media hora. Esta

prueba puede no ser necesaria si se ha realizado una prueba de temperatura antes de la prueba sin carga.

3.2.4.4. Efectuar la prueba al vacío (Sección 3.2.1.4).

3.2.4.5. Realizar el cálculo de las pérdidas del motor y sus respectivas correcciones como lo especifica la sección 3.2.1 de procedimientos básicos.

3.2.4.6. Las pérdidas residuales se calculan a partir del método indirecto. (Sección 3.2.1.11).

3.2.5. Método C: Máquinas Duplicadas

Las dos máquinas se juntan y deben ser capaces tanto de entregar como de absorber energía. Tenga presente que, durante la prueba de carga, una de ellas M1 debe estar conectada a una fuente de voltaje variable con frecuencia variable y la otra máquina M2 debe tener fuente de alimentación de frecuencia constante.

3.2.5.1. Realizar la prueba de resistencia en frío terminal con la máquina conectada en la configuración que se utilizará en la prueba de eficacia. Seguir el procedimiento 3.2.1 del apartado de pruebas básicas de este documento.

3.2.5.2. Realizar la prueba en vacío (Revisar sección 3.2.1.4) conectando ambas máquinas como motores sin carga conectada como lo especifica el apartado de pruebas básicas de este documento.

3.2.5.3. Prueba con carga

Acople las dos máquinas juntas donde M1 se alimenta desde la fuente de frecuencia nominal y M2 desde la fuente variable. M1 se cargará como motor y como generador en las corrientes de línea correspondientes a cuatro puntos de carga aproximadamente equidistantes entre e incluyendo el 25% - 100% de carga. En cada punto de prueba, tomar lecturas de energía eléctrica, corriente, voltaje, frecuencia y temperatura de bobinado del estator o resistencia de bobinado del estator para ambas máquinas, junto con la velocidad y la temperatura ambiente.

La prueba debe iniciarse en el punto de carga más alto con la máquina M1 operando como un motor. Mientras mantiene la tensión nominal y la frecuencia en la máquina M1, disminuya la frecuencia y el voltaje en la máquina M2 hasta que la corriente de línea para la máquina M1 sea aproximadamente igual a la del punto de carga más alto. Se acepta un punto de prueba válido siempre y cuando, la tensión en la máquina M2 dividida en la frecuencia de esa tensión, sea igual, a la tensión nominal dividida por la frecuencia nominal, se deben obtener las lecturas anteriores.

Inmediatamente después, incremente la frecuencia y el voltaje de M2 sobre frecuencia nominal hasta la corriente de M1 que ahora opera como generador, se realiza el mismo procedimiento. Cuando el voltaje / Frecuencia sea la correcta, entonces este es el punto de prueba válido y deben anotarse las medidas.

Los dos conjuntos de lecturas, con la máquina M1 operando como motor y como generador, completan los datos de prueba requeridos para ese punto de carga. Entonces la prueba puede proceder al punto de prueba siguiente y el sistema de datos con la máquina M1 que actúa como generador se puede recoger primero.

3.2.5.4. Usar el formato C en la guía 9.8. del estándar IEEE112, ayudarse del formato C2 en la sección 9.9 de la norma. Tener cuidado al organizar los datos, El formulario C está arreglado para presentar todos estos datos en la secuencia correcta.

3.2.5.5. Calcular las Pérdidas por fricción y viento, del Núcleo y el estator como lo especifica el apartado 3.2.1 de procedimientos básicos.

3.2.5.6. Para el cálculo de las pérdidas del rotor, se debe conectar M1 como motor, mientras M2 funciona como generador. Estas pérdidas se determinan a partir de las ecuaciones 21 y 22,

$$\begin{aligned}
 & \text{Pérdidas en el rotor del motor} \\
 &= \text{Deslizamiento del motor} \\
 & * (\text{Potencia de entrada del motor} - \text{Peridas en el estator} \\
 & - \text{Perdidas en el núcleo})
 \end{aligned}$$

[Ecuación 21]

$$\begin{aligned}
 & \text{Pérdidas en el rotor del generador} \\
 &= \text{Deslizamiento del generador} \\
 & * (\text{Potencia de salida del generador} - \text{Peridas en el estator} \\
 & - \text{Perdidas en el núcleo})
 \end{aligned}$$

[Ecuación 22]

Donde los anteriores valores, son la energía a través del boquete de aire del motor y el deslizamiento del motor en p.u., el deslizamiento se calcula a partir de la velocidad y frecuencia medida.

3.2.5.7. Pérdidas residuales (Método indirecto)

- *Maquina M1 operando como un motor.*

La combinación de pérdidas parásitas se determina, restando de las pérdidas totales aparentes, las pérdidas del estator (temperatura de prueba), pérdidas del núcleo, pérdidas por fricción y viento, además, las pérdidas del rotor corresponden al valor medido del deslizamiento. Las pérdidas residuales se asumen proporcional al cuadrado de la corriente del rotor. Para ello usar las ecuaciones 23 y 24,

Para la máquina M1, las pérdidas por carga parasita del motor se calcula así:

$$P_{cp_m} = \text{Perdidas del rotor del motor} * \frac{\text{Pérdidas de carga parásita combinada}}{\text{Perdidas del rotor del motor} + \text{Perdidas del rotor del generador}}$$

[Ecuación 23]

Para la máquina M2, las pérdidas de la carga del generador, se halla:

$$P_{cp_g} = \text{Pérdidas de carga parásita combinada} - P_{cp_m} \quad [\text{Ecuación 24}]$$

- *Máquina M1 operando como un generador.*

Repita el paso anterior, pero con el flujo de energía invertido. La máquina M2 es ahora el motor y su pérdida residuales se determina usando la ecuación 23. La máquina M1 es ahora el generador y su pérdida residuales se determina usando la ecuación 24.

El valor preliminar de las pérdidas por carga parasita para cada máquina M1 y M2 es el promedio de los valores obtenidos al conectarse como motor y como generador. Usar este promedio en las pérdidas en el alineamiento de cargas parasitas.

3.2.5.8. Las correcciones residuales pueden aplicarse a cualquier máquina M1 o M2. Todas las demás correcciones preferiblemente aplicarlas sobre M1.

La aproximación de las cargas parasitas se realiza usando un análisis de regresión lineal basada en la ecuación de las pérdidas residuales como una función del cuadrado de la corriente del rotor. Los resultados del análisis deben linealizarse con la ecuación:

$$P_{SLavg} = A(I_{2avg})^2 + B \text{ [Ecuación 25]}$$

Donde:

P_{SLavg} : Valor promedio de las pérdidas residuales, en Watts vs. la aproximación del cuadrado de la corriente del rotor.

I_{2avg} : Promedio de corriente del rotor en amperios.

A: Es la pendiente.

B: Intersección con cero de la corriente de línea.

El valor de la corriente del rotor I_{2avg} , por cada dirección del flujo de potencia (Como motor y generador) se muestra en siguiente ecuación.

$$I_2 = \sqrt{(I^2 - I_0^2)} \text{ [Ecuación 26]}$$

Donde:

I: Corriente de línea de la máquina probada como motor o generador.

I_0 : Corriente sin carga.

3.2.5.9. Efectuar las correcciones de las pérdidas por carga parásita a partir de la siguiente ecuación,

$$4. \quad P_{SLC} = A(I_2)^2 \text{ [Ecuación 27]}$$

Donde:

A: Es la pendiente de P_{SLC} vs. I_2 de la curva de aproximación de las pérdidas residuales.

I^2 : Corriente del motor por cada punto usado en la curva de aproximación de las pérdidas residuales.

3.2.5.10. Efectuar la corrección de las pérdidas del estator usando la resistencia corregida a la temperatura específica como lo muestra la siguiente ecuación,

$$R_b = \frac{R_a(t_b + k_1)}{t_a + k_1} \text{ [Ecuación 28]}$$

Donde:

R_a : Resistencia de bobinado, en ohmios, a temperatura T_A .

t_a : Temperatura, en °C, de bobinado cuando se midió la resistencia R_A .

t_b : Temperatura, en °C, a la que se va a corregir la resistencia.

R_b : Resistencia de bobinado, en ohmios, corregido a la temperatura TB.

k_1 : Es 234,5 para 100% de cobre de conductividad de IACS, o 225 para aluminio, basado en una conductividad de volumen del 62%.

3.2.5.11. Finalmente, las correcciones por temperatura del rotor, del total de perdidas, la eficiencia, factor de potencia y suma de las características del motor se calculan como lo especifica el apartado 3.2.1 de procedimientos básicos.

4.2.5. Método E o E1: Medida de la Energía Eléctrica con Segregación de Pérdida

Este método mide la potencia de entrada y determina la potencia de salida por sustracción de las pérdidas totales de la entrada. El total de pérdidas es igual a la suma de las pérdidas corregidas del estator y el rotor, a la temperatura específica para la corrección de resistencia, pérdidas de núcleo, fricción y viento, y pérdidas por cargas parásitas.

4.2.6.1. Realizar la prueba con carga como lo especifica el apartado de pruebas básicas de este documento.

4.2.6.2. Realizar la prueba al vacío y frecuencia nominal (Sección 3.2.1.4).

4.2.6.3. Realizar el cálculo de las pérdidas del motor como lo especifica el apartado 3.2.1 de procedimientos básicos.

4.2.6.4. Efectuar una prueba de pérdidas residuales en carga nominal de acuerdo a los siguientes métodos:

4.2.6.4.1. Método E

Para hallar las pérdidas residuales a plena carga se usa el método directo, el cual combina la frecuencia fundamental y los componentes de alta frecuencia, los cuales se prueban de acuerdo a los procedimientos de la tabla 3. Finalmente desarrollar las siguientes ecuaciones,

$$P_{SL} = P_{SLs} + P_{SLr} \text{ [Ecuación 29]}$$

Donde:

P_{SLs} : Pérdida residual en la carga a frecuencia fundamental en watts.

$$P_{SLs} = (P_S - \text{Pérdida } I^2R \text{ del estator}) \text{ [Ecuación 30]}$$

P_{SLr} : Pérdida a alta frecuencia en watts.

$$P_{SLr} = (P_r - P_m) - (P_{rr} - P_{SLs} - \text{Pérdida } I^2R \text{ del estator}) \text{ [Ecuación 31]}$$

P_m : Potencia mecánica en W requerida para accionar el motor sin aplicar voltaje a los terminales del devanado del estator.

P_r : Potencia mecánica en W requerida para accionar el rotor.

P_{rr} : Entrada eléctrica en W al devanado del estator durante la prueba de rotación inversa.

P_s : Entrada eléctrica en W al devanado del estator con rotor removido.

Durante ambas pruebas, se debe aplicar las correcciones de error de ángulo de fase se apliquen a todas las lecturas de vatímetro para los factores de baja potencia. Consulte la norma IEEE Std 120-1989.

Frecuencia fundamental	Altas frecuencias
Las pérdidas residuales que se produce en la frecuencia fundamental se determinan aplicando tensión polifásica equilibrada a los terminales de bobinado del estátor con el rotor retirado. La entrada eléctrica menos la pérdida del estátor I^2R a temperatura de prueba es igual a las pérdidas residuales de la frecuencia fundamental. Variar la tensión aplicada para obtener las corrientes establecidas y registrar la potencia de entrada y la corriente y la temperatura de bobinado. $I_2 = \sqrt{(I^2 - I_0^2)} \text{ [Ecuación 32]}$ I_2: Es el valor de la corriente de bobinado del estátor, en amperios. I: El valor de la corriente sin carga, en amperios. I_0: es el valor de funcionamiento de la corriente de línea del estátor, en amperios.	Se debe realizar una prueba de rotación inversa. Con el motor completamente montado, aplique tensiones polifásicas equilibradas a la frecuencia nominal en los terminales de bobinado del estátor. Se debe cortocircuitar los bornes del rotor, asegurarse que el rotor sea conducido con velocidad síncrona y en dirección opuesta del campo de rotación del estator NOTA: Mida la potencia mecánica para impulsar el motor, la potencia de entrada eléctrica y la corriente, y la temperatura de bobinado, comenzando desde la corriente de entrada 0.

Tabla 3: Prueba de frecuencia fundamental y a altas frecuencias para el método E. Fuente: (IEEE, IEEE112 Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, 2004)

4.2.6.4.2. Método E1

Las pérdidas residuales se determinan a partir de un valor supuesto y no se requiere ninguna prueba.

Potencia nominal (kW)	Porcentaje de pérdidas residuales a carga nominal
1-90	1.8%
91-375	1.5%
376-1850	1.2%
1851 - más	0.9%

Tabla 4: Porcentaje de pérdidas residuales asumidos para métodos E1, F1 y E1/F1 de la norma IEEE112. Fuente: (IEEE, 2010)

4.2.6.5. Calcular el rendimiento del motor o del generador utilizando el formulario E en 9,10 de EI IEEE112. El origen de cada uno de los elementos en el formulario E o el método de su cálculo se muestra en el formulario E2 en 9,11.

4.2.6.6. Calcular la eficiencia del motor / generador por cada punto de prueba haciendo uso de los valores de salida y entrada en el cálculo de pérdidas totales

4.2.6.7. Calcular El factor de potencia para cada punto de prueba, referirse al apartado 3.2.1.17 de procedimientos básicos de este documento.

Método F o F1: Circuito equivalente

4.2.6.8. Realizar la prueba con carga como lo especifica el apartado 3.2.1.3 de pruebas básicas de este documento.

4.2.6.9. Realizar la prueba al vacío y frecuencia nominal (Sección 3.2.1.4).

4.2.6.10. Se debe efectuar una prueba de impedancia, para lo cual tener en cuenta:

- Las lecturas del voltaje, la corriente, la potencia de entrada eléctrica y la resistencia del estator o la temperatura del devanado del estator deben tomarse a una o más frecuencias, voltajes y / o cargas. Estos datos se conocen como datos de impedancia.
- Si la máquina que se está probando tiene un rotor enrollado, se debe cortocircuitar el rotor para la prueba.
- La reactancia y la impedancia se determinarán a la temperatura de la máquina en el momento de la prueba.
- Las pruebas de reactancia se realizarán a la corriente de carga nominal.
- El valor de la reactancia utilizada en el cálculo del circuito equivalente debe tener el valor correcto de saturación y efecto de barra profunda; de lo contrario, se encontrará que el factor de potencia calculado es mayor que el valor verdadero.
- Los valores de resistencia deben corregirse a la temperatura especificada antes de tomarse como un parámetro de circuito equivalente.

La prueba de impedancia se lleva a cabo siguiendo los siguientes métodos:

Método 1- Prueba de impedancia de rotor bloqueado de tres fases a un máximo del 25% de la frecuencia nominal y a la corriente nominal.

Método 2- Pruebas de impedancia de rotor bloqueado trifásico en tres frecuencias; uno a frecuencia nominal, uno a aproximadamente el 50% de la frecuencia nominal, y uno a un máximo del 25% de la frecuencia nominal, todos a corriente nominal. Las curvas deben desarrollarse a partir de estos tres puntos de prueba y usarse para determinar los valores de la reactancia total y la resistencia del rotor a la frecuencia reducida requerida.

Método 3 - Prueba de impedancia a una velocidad de deslizamiento que se aproxima a la frecuencia de rotor reducida deseada. En este método, el motor se conduce desacoplado o acoplado a una carga reducida, y el voltaje se reduce hasta un punto de deslizamiento cercano de la carga completa. El deslizamiento debe medirse cuidadosamente.

Método 4 - Cuando ninguno de los métodos anteriores es práctico, se puede utilizar una prueba de impedancia de rotor bloqueado y trifásica a tensión reducida a frecuencia nominal que da como resultado una corriente nominal aproximada y una prueba bajo carga.

4.2.6.11. Determinar el circuito equivalente

Los parámetros de la máquina en el circuito equivalente se derivan de los datos de la prueba sin carga y la prueba de impedancia. Tener en cuenta que la precisión de los datos del circuito equivalente depende del procedimiento para determinar las características del rotor a baja frecuencia, en especial al medir R_2 , que representa la resistencia real del rotor a las corrientes

de baja frecuencia. También, al medir X_2 , que representa la reactancia real de fugas de rotor a corrientes de baja frecuencia.

Este circuito también se usa para determinar la corriente del rotor utilizada para determinar las pérdidas de carga residual utilizadas en otros métodos de prueba de eficiencia.

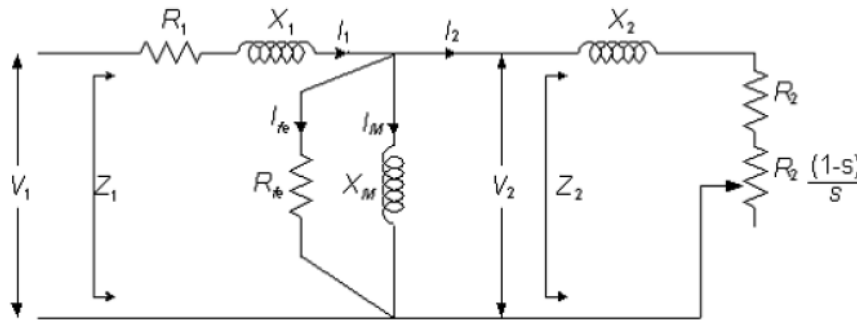


Ilustración 6: Circuito equivalente de un motor de inducción asíncrona. Fuente: (Chapman, 2012)

El circuito equivalente representa una fase de una máquina trifásica conectada en estrella y se puede usar incluso, si la máquina bajo prueba tiene una conexión interna delta. Todos los valores de tensión, corriente, resistencia y reactancia del rotor se refieren al estator y no son valores de rotor verdadero, pero se pueden usar a lo largo de este estándar siempre que se especifiquen los parámetros del rotor.

V1: Voltaje de fase, en V

V2: Voltaje de fase del rotor referido al estator, en V

f: Frecuencia, en Hz

I1: Corriente de línea o estator, en A

I2: Corriente del rotor referida al estator, en A

Im: Corriente magnetizante, en A

Ife: Corriente de pérdida central, en A

M: Número de fases

R1: Resistencia del estator, en ohmios

R2: Resistencia del rotor referida al estator, en ohmios

Rfe: Resistencia de pérdida de núcleo, en ohmios

Gfe: Conductancia de pérdida de núcleo, en siemens

X1: Reactancia de fuga del estator, en ohmios

X2: Reactancia de fuga del rotor referida al estator, en ohmio

4.2.6.12. Realizar el proceso de pérdidas por fricción y viento, estator, núcleo y rotor especificado en la sección 3.2.1 de las pruebas básicas.

4.2.6.13. Realizar el cálculo de las pérdidas residuales de acuerdo al método F o F1 que se explica a continuación:

4.2.6.13.1. Prueba del método F

Para hallar las pérdidas residuales a plena carga se usa el método directo, recordar la ecuación:

$$P_{SL} = P_{SLs} + P_{SLr} \text{ [Ecuación 29]}$$

4.2.6.13.2. Prueba del método F1

La pérdida de carga parasita se determina a partir de un valor supuesto de pérdidas residuales seleccionadas a partir de la Tabla 4.

- 4.2.6.14. Suponer valores de deslizamiento y proceder según formato F2.9.13 del EI IEEE112.
- 4.2.6.15. Seleccionarán nuevos valores de deslizamiento que puedan representar más claramente los puntos de carga deseados.
- 4.2.6.16. Repetir cálculos del formato F2.9.13 del EI IEEE112.
- 4.2.6.17. Realizar los cálculos de rendimiento de formatos F y F2 (9,12 y 9,13) del EI IEEE112.
- 4.2.6.18. Calcular el valor del torque máximo o de ruptura en un motor se puede aproximar a partir del procedimiento de cálculo del formato 9.13 del EI IEEE112, utilizando el valor de deslizamiento que se muestra en la siguiente ecuación:

$$S = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad [\text{Ecuación 33}]$$

Los valores X_1 , X_2 , R_1 y R_2 son los mismos del circuito equivalente.

4.2.7. Otras Pruebas

4.2.7.1. Voltaje del rotor

En las máquinas de rotor bobinado, los voltajes deben medirse entre todos los terminales del rotor, con el rotor bloqueado y sus bobinados en circuito abierto y con la tensión nominal aplicada al estator. Si se detecta un desequilibrio, es práctica habitual tomar lecturas con varias posiciones del rotor para determinar un promedio.

4.2.7.2. Prueba del rotor bloqueado

Corriente: Esta prueba ayuda a determinar la calidad y el rendimiento. Las lecturas se tomarán a voltaje y frecuencia nominal. Cuando se realiza la prueba para verificar la calidad de las máquinas de jaula de ardilla, es posible omitir los medios mecánicos de bloqueo del rotor aplicando potencia monofásica de voltaje y frecuencia nominales a cualquiera de los dos terminales de línea de la máquina de un trípode

Torque: El par de rotor bloqueado se toma como el par mínimo desarrollado en reposo en todas las posiciones angulares del rotor. El par se puede medir con un transductor de escala o fuerza con una cuerda y polea, o con un freno o una viga, o se puede medir directamente usando un transductor de par en línea. Los motores de rotor de bobina siempre están sujetos a variaciones en el torque del rotor bloqueado, dependiendo de la posición angular del rotor con respecto al estator. Para los motores de jaula de ardilla, es práctica habitual bloquear el rotor en cualquier posición conveniente. Si el par del rotor bloqueado no se mide directamente como se mencionó anteriormente, el par aproximado del rotor bloqueado se puede calcular como se muestra en la ecuación

Potencia: Las lecturas de la potencia de entrada deben tomarse simultáneamente con las de voltaje, corriente y par.

4.2.7.3. Prueba de velocidad de torque y velocidad de corriente

La selección del método depende del tamaño y las características del tiempo de velocidad de la máquina y las instalaciones de prueba. En los cuatro métodos, el registro debe tener puntos

de prueba para garantizar que las curvas se puedan completar, las irregularidades incluidas, las regiones de interés de los datos de prueba.

En el caso de motores de rotor bobinados, los anillos colectores cortocircuitarse para esta prueba. El Método 1 y el Método 4 requieren el mantenimiento de una velocidad constante para cada lectura. Por lo tanto, no pueden usarse en regiones donde el par de torsión de la máquina aumenta con la velocidad más rápidamente que la del dispositivo de carga. A partir de los resultados de las siguientes pruebas, ajustadas al voltaje nominal, las curvas de par y corriente se deben representar frente a la velocidad.

Método 1: Medida de la salida.

Método 2: Aceleración.

Método 3: Entrada.

Método 4: Medida directa.

4.2.7.4. Corrección de datos para pruebas realizadas a voltaje reducido

Cuando sea necesario establecer valores de corriente y par a la tensión nominal, en función de las pruebas de velocidad de par con rotor bloqueado realizadas a tensión reducida, un método de prueba es trazar en papel logarítmico las curvas de la velocidad de cambio de la corriente y del par de torsión para tres o más, valores de voltaje, después de deben corregir los datos usando el método de mínimos cuadrados para obtener la máxima precisión. En las curvas de velocidad-par y velocidad-corriente, se deben corregir suficientes puntos a varias velocidades para proporcionar una representación real de la curva en todo el rango de velocidad.

3.3. IEC60034-2-1 Métodos para la Determinación de la Eficiencia para Máquinas Eléctrica Rotativas

Medición directa					
Ensayo con medida del par	Ensayo de alimentación doble en oposición				
Medición indirecta					
Ensayo de alimentación única en oposición	Sumatoria de pérdidas con medida del par y ensayo con carga				
	Hallar las pérdidas constantes, de estator, rozamiento y viento				
	Hallar las pérdidas residuales				
	Con medida del par	Sin medida del par			
		A partir de pérdidas asignadas.	A partir de un ensayo con y sin el rotor.	A partir de un ensayo en estrella Eh-star.	A partir de un circuito equivalente

Tabla 5: Diagrama representativo de organización de la norma IEC60034-1-2 Fuente: Autor

Esta norma proporciona básicamente dos opciones para encontrar la eficiencia del motor, directa o indirectamente. A diferencia de EI IEEE112 no existe un orden específico para el procedimiento.

Los métodos directos resultan del promedio de la potencia y la corriente eléctrica suministrada, con la potencia mecánica de salida, esta última basada en el torque del eje y velocidad rotacional. En cambio, los métodos indirectos, calculan la eficiencia energética del motor a partir de la sumatoria de las pérdidas del motor.

A continuación, se explicarán los procedimientos que establece la norma IEC60034-2-1 para encontrar la eficiencia de los motores eléctricos. Para la práctica se usó el método indirecto de suma de pérdidas sin medida del par y para encontrar las pérdidas adicionales se realizó a partir de un ensayo en estrella hallando la resistencia R_{eh} .

3.3.1. Métodos directos

3.3.1.1. Método directo con medida del par

Designado por la norma como preferente en potencias inferiores a 1 kW. El par motor o torque, es la fuerza ejercida sobre el eje de potencia de salida

Se debe conectar el sistema con carga, variar los voltajes de entrada de forma descendente y medir la potencia eléctrica absorbida (P_{ab}), el par de salida (T) y la velocidad (W), como se ve en la ecuación 34, no sin antes calcular la potencia útil (P_u) utilizando la siguiente ecuación,

$$P_u = TW \text{ [Ecuación 34]}$$

Donde,

P_u : Es la potencia útil en Watts

T : Es el par motor (En Newton metro)

W: Es la velocidad angular (En radianes/segundos)

$$W = \frac{rpm * 2\pi}{60} \text{ [Ecuación 35]}$$

Finalmente, la eficiencia se obtiene a partir de la potencia útil (Pu) y la potencia absorbida (ab), con las siguiente formula:

$$Eficiencia = 100 * \frac{Pu}{P_{ab}} \text{ [Ecuación 36]}$$

3.3.1.2. Ensayo de alimentación doble en oposición

La norma IEC60034-1-2 indica que esta prueba conviene aplicarla a maquinas polifásicas y monofásicas con potencia nominal inferior o igual a 1kW.

Para el procedimiento se requiere dos máquinas duplicadas, M1 actuará como generador y M2 como motor. Enseguida, se acoplan eléctricamente M1 y M2. Debe registrarse los datos de potencia de entrada promedio entre las terminales de las maquinas acopladas, potencia de entrada excluyendo excitación, frecuencia, velocidad y temperatura. Para calcular la eficiencia se utiliza la siguiente ecuación:

$$Eficiencia = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2}} \text{ [Ecuación 37]}$$

Donde las pérdidas totales se calculan así:

$$P_T = \frac{1 * (P_1 - P_2)}{2} \text{ [Ecuación 38]}$$

3.3.2. Métodos indirectos

3.3.2.1. Ensayo de alimentación única en oposición

Designado por la norma como preferente en potencias iguales o inferiores a 1 kW.

Se acoplan mecánicamente dos máquinas idénticas a la misma red eléctrica, M1 actuará como generador y M2 como motor, cada máquina aporta el 50% del total de las pérdidas del sistema, las cuales son iguales a la potencia de entrada de la red (PT), como se ve en la Ilustración 7,

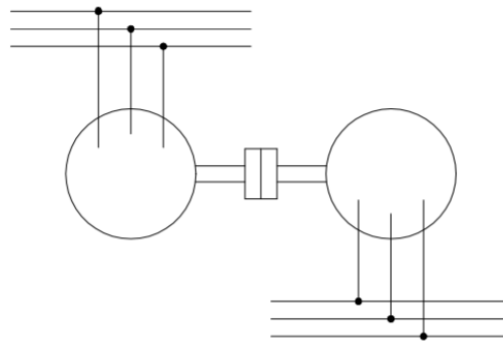


Ilustración 7: Ensayo mecánico único en oposición de la norma IEC2464-1-2. Fuente (Galindo, 2010)

Tener en cuenta que acoplar mecánicamente dos máquinas depende de la diferencia del ángulo de fase entre ellas y el dispositivo de ajuste de velocidad como una caja de engranajes, asegura la correcta transmisión de potencia.

La eficiencia se calcula con la fórmula:

Donde:

$$n = 1 - \frac{P_T}{P_M} \text{ [Ecuación 39]}$$

P_T : Es la mitad de la potencia total absorbida por el sistema

P_M : Potencia absorbida por la máquina que se desempeña como motor.

3.3.2.2. Sumatoria de pérdidas

La eficiencia del motor se calcula a partir de las pérdidas y la potencia absorbida, a partir de la siguiente ecuación:

$$n = \frac{p_{ABS} - \text{Pérdidas}}{p_{ABS}} \text{ [Ecuación 40]}$$

3.3.3. Pérdidas del motor

3.3.3.1. Hallar las pérdidas del estator en carga

Bajo una prueba con carga y diferentes valores de tensión de entrada se calcula las pérdidas del estator a partir de la ecuación:

$$P_{EST} = 1.5 * R_{fase} - I_{f0} \text{ [Ecuación 41]}$$

R_{fase} : Resistencia de fase a la temperatura de ensayo en vacío

I_{f0} : Corriente de fase en el ensayo al vacío

3.3.3.2. Hallar las pérdidas constantes

Para hallar las pérdidas de entrehierro, por rozamiento y ventilación se debe realizar una prueba en vacío a tensión y frecuencia nominal. Ir tomando los valores de potencia absorbida por el motor, además, la corriente y resistencia de fase. Se realizan los siguientes cálculos:

$$P_{EH} = P_{AB0} - P_{EST} \text{ [Ecuación 42]}$$

Donde,

P_{EH} : Pérdidas constantes o entrehierro

P_{AB0} : Potencia absorbida en prueba al vacío.

P_{EST} : Perdidas del estator

3.3.3.3. Determinar las pérdidas en el hierro, por rozamiento y ventilación

El motor se debe energizar a tensión variable y al vacío. El punto de corte entre las rectas de regresión que se deben graficar con los datos obtenidos de las pérdidas constantes en función

de la tensión aplicada al cuadrado, corresponde a las pérdidas en el hierro, rozamiento y ventilación.

3.3.3.4. Determinar las pérdidas en el rotor

Al igual que las pérdidas del estator se realiza una prueba con carga y se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_R = (P_{AB} - P_{EST} - P_{EH}) * S \text{ [Ecuación 43]}$$

$$S = 1 - \frac{P}{f} \text{ [Ecuación 44]}$$

Donde:

P_{AB} : Potencia absorbida en watts.

P_{EST} : Pérdidas del estator.

P_{EH} : Pérdidas en entrehierro o núcleo.

S : Deslizamiento

P : Número de polos del motor.

f : Frecuencia en Hertz

Las pérdidas corregidas del devanado del rotor se determinan con una temperatura de 25 C°.

3.3.3.5. Hallar las pérdidas residuales (PLL)

3.3.3.5.1. Pérdidas residuales con medida del par

En la misma prueba con carga, se debe realizar la medida del par o torque del motor por cada variación de voltaje de entrada. A estas alturas ya es posible hallar las pérdidas residuales, así:

$$P_{LR} = P_{AB} - P_{Estator} - P_{Rotor} - P_{Rozamiento} \text{ [Ecuación 45]}$$

T : Par de salida

ω : Velocidad en rad/seg

Ahora, con los datos obtenidos de las pérdidas parásita por cada punto, se grafican (Regresión lineal) en función del cuadrado del par (T).

Finalmente, al obtener la pendiente de la gráfica anterior (PLR vs. T^2), se calcula las pérdidas residuales con la fórmula:

$$P_{ad} = A * T^2 \text{ [Ecuación 46]}$$

Donde A es el punto de intersección de la gráfica pérdida residuales vs. Torque al cuadrado.

3.3.3.5.2. Pérdidas residuales sin medida del par

3.3.3.5.2.1. PLL a partir de las pérdidas asignadas

Este método con carga nominal se extrae a partir de la curva obtenida del porcentaje de la potencia absorbida $P_{ab} = P_1$, usando las siguientes formulas:

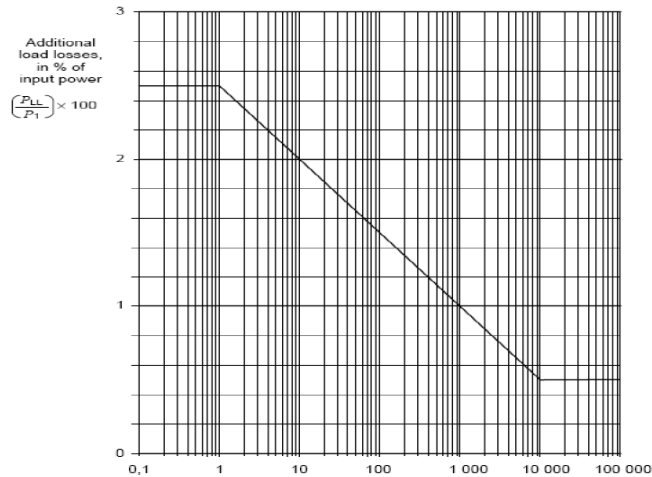


Ilustración 8: Curva obtenida para hallar las pérdidas residuales PLL a partir de las pérdidas asignadas. (IEC, 2007)

P. útil ≤ 1KW	$P_{LL} = P_{ab} * 0.025$ [Ecuación 47]
1KW < P. útil < 10000KW	$P_{LL} = P_{ab} * (0.025 - 0.005 \log_{10} \frac{P_{\text{útil}}}{1KW})$ [Ecuación 48]
P. útil ≤ 10000KW	$P_{LL} = P_{ab} * 0.005$ [Ecuación 49]

Tabla 6: Pérdidas residuales PLL dependiendo de la potencia útil de la máquina rotativa. Fuente: (IEC, 2007)

Para puntos de carga diferentes del nominal (P_{ad}'), la corrección de estas pérdidas adicionales se realiza a partir de la ecuación:

$$P'_{ad} = P_{ad} * \frac{I_1^2 - I_0^2}{I_{1n}^2 - I_0^2} \text{ [Ecuación 50]}$$

Donde:

I_0 : Corriente absorbida en vacío.

I_1 : Corriente absorbida en el punto de carga.

I_{1n} : Corriente absorbida en condiciones nominales.

3.3.3.5.2.2. A partir de un ensayo con y sin el rotor

Se necesita un segundo motor de potencia inferior a 5 veces las pérdidas del motor a ensayar. Con o sin rotor, esta prueba a frecuencia nominal, consiste en variar la corriente que se induce por el estator de la máquina que funciona como motor y calcular la corriente de carga del rotor I_L . A partir de la siguiente ecuación:

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_0^2} \text{ [Ecuación 51]}$$

Donde:

I_L : Valor de la corriente del estator durante el ensayo proporcionando una corriente de carga deseada

I_0 : Corriente en vacío con tensión nominal

Durante el ensayo con rotor, se debe alterar el sentido del campo magnético con ayuda externa, manteniendo la velocidad síncrona del motor. En un primer momento se mide la potencia de la máquina que actúa como generador con $I=0$, y se energiza el estator hasta que se minimicen las pérdidas por fricción y viento. Después, se deben medir la corriente, resistencia, temperatura del devanado y potencia de entrada, buscando igualar los valores de la corriente del estator a los obtenidos durante la prueba sin rotor; en dicha prueba, se toman los mismos parámetros y es necesario corregir las corrientes parásitas en las tapas o en los rodamientos.

3.3.3.5.2.3.A partir del circuito equivalente

Esta prueba se aplica cuando no es posible hacer un ensayo sin carga, los datos se obtienen de la prueba al vacío y del rotor bloqueado.

Tener en cuenta que la precisión de los datos del circuito equivalente depende del procedimiento para determinar las características del rotor a baja frecuencia, en especial al medir R_2 , que representa la resistencia real del rotor a las corrientes de baja frecuencia. También, al medir X_2 , que representa la reactancia real de fugas de rotor a corrientes de baja frecuencia.

El circuito equivalente representa una fase de una máquina trifásica conectada en estrella y se puede usar incluso, si la máquina bajo prueba tiene una conexión interna delta. Todos los valores de tensión, corriente, resistencia y reactancia del rotor se refieren al estator y no son valores de rotor verdadero, pero se pueden usar a lo largo de este estándar siempre que se especifiquen los parámetros del rotor.

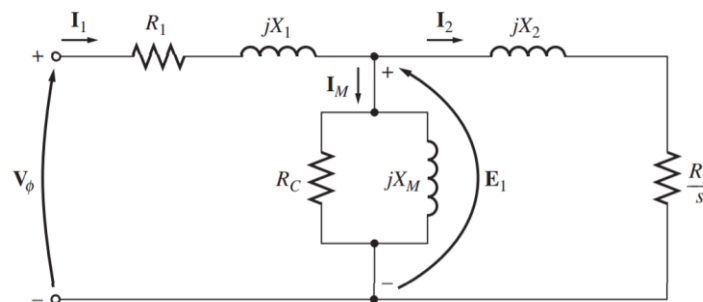


Ilustración 9: Circuito equivalente de una máquina trifásica. Fuente: (IEC, 2007)

La resistencia y reactancia referidas R_2 y X_2 , se pueden hallar más fácilmente, ya que la resistencia del rotor y la reactancia del rotor en estado bloqueado es casi imposible de medir en un motor de jaula de ardilla.

R_1 : Resistencia por fase de los arrollamientos del estator dado en Ohm.

R_2 : Resistencia por fase de los arrollamientos del rotor dado en Ohm.

R_c : Resistencia que representa las pérdidas en el hierro

X_1 : Reactancia asociada a los flujos de dispersión presentados en los devanados del estator ante una frecuencia de red específica (referida al estator)

X_2 : Reactancia asociada a los flujos de dispersión presentados en los devanados del rotor ante una frecuencia de red específica (referida al estator)

X_M : Reactancia de magnetización generado en el entEh-starierro.

V_{ϕ} : Tensión eficaz que alimenta el motor. Para conexión en Y del motor, se divide entre raíz de 3. I_M : Corriente de magnetización del material en vacío.

S : Es el deslizamiento de la máquina.

Para hallar las pérdidas residuales a plena carga se usa el método directo, equivalente al total de la frecuencia fundamental y los componentes de alta frecuencia.

$$P_{SL} = P_{SLs} + P_{SLr} \text{ [Ecuación 29]}$$

Donde:

$PSLS$: Pérdida residual en la carga a frecuencia fundamental en watts (PS – pérdida I²R estator).

$PSLr$: Pérdida a alta frecuencia en watts. (Pr – Pm) – (Prr – PSLS – pérdida I²R estator).

Pm : Potencia mecánica en Watts requerida para accionar el motor sin aplicar voltaje a los terminales del devanado del estator.

Pr : Potencia mecánica en W requerida para accionar el rotor.

Prr : Entrada eléctrica en W al devanado del estator durante la prueba de rotación inversa.

Ps : Entrada eléctrica en W al devanado del estator con rotor removido.

3.3.3.5.2.4. A partir de un ensayo de resistencia R_{eh}

La prueba inicia sin carga, variando la tensión de entrada desde la más alta de forma descendente, anotando los valores de corriente, voltaje, potencia por fases y velocidad de funcionamiento.

Tener en cuenta que el punto de estrella no se debe conectar al neutro del sistema ni a tierra, para evitar corrientes de secuencia cero. El objetivo es sobrecargar una fase, entonces, la tercera fase del motor se conecta a la línea de energía por medio de una resistencia R_{eh} , cuyo valor varía para motores con conexión estrella y en delta así:

Resistencia Eh-star		Fórmula
Estrella	20,01480933	$R_{eh} = \frac{\sqrt{3} * V_N}{I_N} * 0.2$ [Ecuación 52]
Delta	300,22214	$R_{eh} = \frac{V_N}{\sqrt{8}} * 0.2$ [Ecuación 53]

Tabla 7: Resultados de la resistencia R_{eh} calculados para el motor conectada en estrella y en delta.

Fuente: Autor

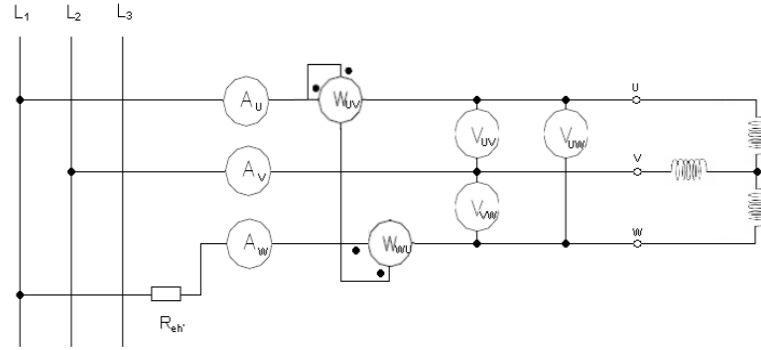


Ilustración 10: Circuito diseñado para agregar la resistencia Eh-star de la norma IEC60034-2-1 en la prueba con carga. Fuente: (Galindo, 2010)

Para motores con conexión nominal en estrella la corriente de prueba I_t está dada por:

$$I_t = \sqrt{I_N^2 - I_0^2} \text{ [Ecuación 54]}$$

Donde:

I_N : Valor nominal de la corriente de línea

I_0 : Valor de la corriente de línea que toma la máquina sin carga

Las pérdidas adicionales resultan del análisis de regresión lineal de la corriente negativa al cuadrado respecto a la corriente de prueba I_t al cuadrado

$$P_{LR} = \left(\frac{I_{i(2)}}{I_t}\right)^2 + B \text{ [Ecuación 55]}$$

3.4. IEEE 1459- Definiciones Estándar para la Medición de Energía Eléctrica

La Definiciones estándar de IEEE para la medición de energía eléctrica cantidades en sinusoidal, condiciones de fuerza, equilibradas o desequilibradas, estandariza la medición de la cantidad de potencia eléctrica en condiciones sinusoidales, no sinusoidales, balanceadas o desbalanceadas en sistemas monofásicos y trifásicos. (IEEE, IEEE 1459 Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, 2010). Esta norma aplica para tres situaciones. La primera, cuando las ondas de corriente y voltaje no tienen una forma sinusoidal pura. Segundo, cuando el sistema está en desequilibrio, ya sea por la carga o la fuente. Por último, cuando las componentes de secuencia cero causan que la energía sea disipada por el neutro.

Se debe aclarar que cuando aparece el símbolo $\parallel$ a la izquierda de cada formula, la norma IEEE1954 la recomienda apta para ser utilizada en aparatos de medición.

3.4.1. Sistema con adición de armónicos

En presencia de armónicos en un sistema eléctrico la corriente y el voltaje efectivos rms se pueden separar en dos componentes, la fundamental y la no fundamental, también llamada frecuencia de los armónicos (Emanuel and IEEE Working Group).

Recordar que todos los valores con subíndice H, corresponden a las corrientes y voltajes eficaces de las frecuencias armónicas *rms* por fase-neutro (a, b o c) y del neutro (nH). Por otra parte, los valores con subíndice 1, corresponden a las corrientes y voltajes eficaces de frecuencia fundamental del sistema por fase (a, b o c) y del neutro (n1).

La corriente efectiva I_e en sistemas de cuatro hilos requiere de las corrientes rms por fase de cada armónico (I_{aH} , I_{bH} y I_{cH}) así como del neutro I_{nH} , se calcula con las siguientes fórmulas:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}} \quad [\text{Ecuación 56}]$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2}{3}} \quad [\text{Ecuación 57}]$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2}{3}} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2} \quad [\text{Ecuación 58}]$$

Para sistemas de tres hilos $I_{n1} = I_{nH} = 0$

De manera similar se calcula el voltaje efectivo armónico rms para sistemas de cuatro hilos:

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2]}$$

[Ecuación 59]

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2]}$$

[Ecuación 60]

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_{aH}^2 + V_{bH}^2 + V_{cH}^2) + V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2]} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2}$$

[Ecuación 61]

Para sistemas de tres hilos:

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}}$$

[Ecuación 62]

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2}{9}}$$

[Ecuación 63]

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2}{9}} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2}$$

[Ecuación 64]

Donde, V_{aH} , V_{bH} y V_{cH} son los valores de tensión rms de cada armónico fase-neutro y las tensiones rms de línea por cada armónico son V_{acH} , V_{bcH} y V_{caH} .

Cantidad o indicador	Combinado	Potencia Fundamental	Potencia No-Fundamental
Aparente	S (VA)	S1 (VA)	S_N (VA) S_H (VA)
Activa	P(W)	P1 (W)	P_H (W)
No Activa	N(var)	Q1(var)	D_t (var) D_v (var) D_H (var)
Línea de uso	PF=P/S	PF1=P1/S1	-
Polución Armónica	-	-	S_N/S_1

Tabla 8: Cantidades de potencias para un sistema trifásico no sinusoidal. Fuente: (IEEE, 2010)

Como se puede observar en la Tabla 8 extraída de la norma IEEE1459, tanto a la señal fundamental como a la de los armónicos (no fundamental) se les puede calcular la potencia aparente, activa y no activa, además del factor de potencia.

3.4.1.1. Potencia aparente (VA)

Se puede calcular por cada componente armónica y sumarla a la fundamental, de la siguiente manera:

$$S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eN}^2 \quad [\text{Ecuación 65}]$$

Donde:

- S_{e1} : Es la potencia fundamental eficaz aparente y está dada por:

$$S_{e1} = 3V_{e1}I_{e1} \quad [\text{Ecuación 66}]$$

- S_{eN} : Es la potencia efectiva aparente no fundamental,

$$S_{eN} = \sqrt{(D_{eI}^2) + (D_{eV}^2) + (D_{eI}^2)} = \sqrt{9(V_{e1}^2 I_{eH}^2) + (V_{eH}^2 I_{e1}^2) + (V_{eH}^2 I_{eH}^2)} \quad [\text{Ecuación 67}]$$

La cual a su vez se descompone en los parámetros:

Potencia de distorsión de corriente D_{eI} (var):

$$D_{eI} = 3(V_{e1}I_{eH}) = S_1(THD_I) \quad [\text{Ecuación 68}]$$

Potencia de distorsión de voltaje D_{eV} (var):

$$D_{eV} = 3(V_{eH}I_{e1}) = S_1(THD_V) \quad [\text{Ecuación 69}]$$

Potencia armónica aparente S_{eH} (VA):

$$S_{eH} = 3(V_{eH}I_{eH}) = S_1(THD_I)(THD_V) = \sqrt{(D_{eH}^2 + P_{eH}^2)} \quad [\text{Ecuación 70}]$$

Donde la distorsión armónica de corriente total THD_I y voltaje total THD_V , se determinan por la relación entre sus componentes fundamentales $e1$ y no fundamentales eH , de la siguiente manera:

$$THD_{eV} = \frac{V_{eH}}{V_{e1}} \quad [\text{Ecuación 71}]$$

$$THD_{eI} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \quad [\text{Ecuación 72}]$$

Igualmente, la potencia aparente se analiza al descomponerla en su parte activa P_{eH} y la no activa D_{eH} , usando las siguientes formulas respectivamente:

$$P_H = P - P_1 = \sum_{\substack{j \neq 1 \\ j=A,B,C}} V_{jH} I_{jH} \cos \theta_{jH} \quad [\text{Ecuación 73}]$$

$$D_{eH} = \sqrt{(S_{eH}^2 - P_{eH}^2)} \quad [\text{Ecuación 74}]$$

Donde j es el indicador de línea-fase A, B o C en un sistema trifásico.

3.4.1.2. Potencia activa (W)

Para los motores de C, la potencia activa armónica no es una potencia útil (no contribuyen al par de secuencia positiva). En consecuencia, es necesario separar la potencia activa fundamental P_1 de la potencia activa armónica P_H .

$$P = P_1 + P_H \quad [\text{Ecuación 75}]$$

Donde:

- P_1 : Es la potencia fundamental eficaz activa y está dada por:

$$P_1 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} V_1 i_1 dt = V_1 I_1 \cos \theta_1 \text{ [Ecuación 76]}$$

Donde:

$T = 1/f$ Periodo de tiempo en segundos.

K = Numero de integración positivo.

τ = Tiempo inicial de medición dado en segundos.

- P_H : Es la potencia efectiva activa no fundamental,

$$P_H = V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos \theta_h = P - P_1 \text{ [Ecuación 77]}$$

Donde:

h : Numero de armónico (Puede contener interarmónicos o subarmónicos -no enteros).

V_0 : Voltaje inicial rms línea-neutro (V).

I_0 : Corriente rms inicial línea-neutro (A).

θ : Es el ángulo de fase entre los fasores de la corriente I_h y voltaje V_h del armónico.

3.4.1.3. Potencia no activa (var)

Esta potencia se calcula para sistemas desbalanceados, la potencia no activa solo se puede igualar a la potencia reactiva en un sistema perfectamente equilibrado $N=Q1=Q$.

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \text{ [Ecuación 78]}$$

Donde:

S = Potencia aparente total (VA)

P = Potencia activa total (W)

Resumen y agrupación de cantidades para sistemas trifásicos con formas de onda no sinusoidales

3.4.1.4. Potencia instantánea (p)

En el caso que el sistema de tres líneas la suma de las corrientes de línea es igual a 0 y se utilizan las siguientes ecuaciones,

$$p = v_{ab} i_a + v_{cb} i_c = v_{ba} i_b + v_{ca} i_c = v_{ac} i_a + v_{bc} i_b \text{ [Ecuación 79]}$$

Donde V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} son los voltajes instantáneos de línea a línea.

Por otra parte, para un sistema de 4 hilos (incluye neutro) la potencia instantánea se obtiene así:

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \text{ [Ecuación 80]}$$

Teniendo en cuenta los armónicos que pueden afectar una señal trifásica no sinusoidal (voltaje o corriente) en estado estacionario, la potencia instantánea debe expresarse mediante dos componentes, los componentes de frecuencia del sistema de energía y los términos restantes como en las siguientes ecuaciones:

$$p = vi \text{ [Ecuación 81]}$$

$$p = p_a + p_q \text{ [Ecuación 82]}$$

$$p_a = V_0 V_0 + \sum_h V_h I_h \cos \theta_h [1 - \cos(2hwt - 2\alpha_h)] \text{ [Ecuación 83]}$$

$$p_q = -\sum_h V_h I_h \sin \theta_h \sin(2hwt - 2\alpha_h) + 2 \sum_n \sum_{m \neq n}^m V_h I_h \sin \theta_h \sin(mwt - \alpha_m) \sin(nwt - \beta_n) + \sqrt{2} V_0 \sum_h I_h \sin(hwt - \beta_h) + \sqrt{2} I_0 \sum_h V_h \sin(hwt - \alpha_h) \text{ [Ecuación 84]}$$

Donde $\theta_h = \beta_h - \alpha_h$ es el angulo entre fasores de la corriente I_h y el voltaje V_h de los armónicos.

3.4.1.5. Factor de potencia

Es importante aclarar que, para un sistema de 3 hilos, la energía debe evaluarse como un solo camino. Es un error dividirla por cada línea del sistema. Un factor de potencia igual a la unidad significa pérdidas mínimas de línea del total de la potencia activa transmitida.

$$PF = \frac{P}{S_e} \text{ [Ecuación 85]}$$

La norma IEEE1459 recomienda remplazar los cálculos de potencia aparente aritmética y vectorial por la potencia aparente efectiva, porque varía el valor de factor de potencia obtenido con cada uno de estos métodos y por tanto es poco confiable el resultado.

Lo anterior, de acuerdo a un análisis en el que se compara un sistema balanceado y otro desbalanceado, en el cual se llega a que el factor de potencia calculado aritméticamente FP_A es igual a 0.866 y el FP_B factor de potencia calculado vectorialmente es igual a 1, por tanto ($FP_B \geq FP_A$). Sin embargo, teóricamente, si se conecta una resistencia de línea a neutro para desbalancear el sistema, entonces la potencia activa del otro par de líneas tendría el mismo valor ($S_a=S_b=P$) y por ende el factor de potencia también sería igual ($FP_A = FP_B = 1$).

4. Pruebas de Laboratorio y Análisis de resultados

En este capítulo se procede a explicar cómo se llevaron a cabo las pruebas en el laboratorio de la universidad Santo Tomás del método B del IE IEEE112 (Sección 4.1) y el método para hallar pérdidas residuales a partir de la resistencia E_h -star del IE IEC60034-2-1 (Sección 4.2). Al finalizar se presenta el análisis comparativo de las pérdidas del motor halladas por cada una de las normas (Sección 4.3).

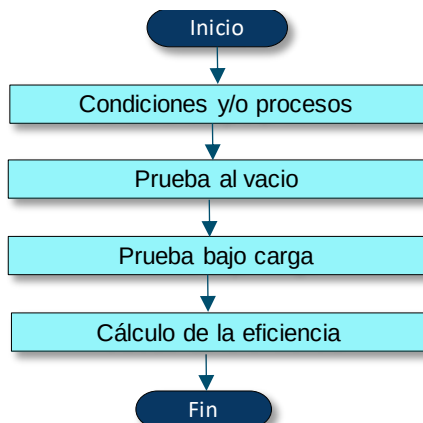


Ilustración 11: Flujograma generalizado de las pruebas realizadas en laboratorio de acuerdo al procedimiento de la norma IEEE112 método B y la norma IEC60034-2-1. Fuente: Autor.

A groso modo se realizaron las pruebas de laboratorio de la norma americana y la europea siguiendo el flujograma de la Ilustración 11, serán las subsecciones de las secciones 4.1 y 4.2.

Por otra parte, en ambas normativas se requirieron los instrumentos que se enlistan a continuación:

- Electro-dinamómetro marca Lab Volt serie EMS 8911.
- Circutor modelo CVM-C10.
- Analizador de calidad de energía trifásico marca AEMC modelo 3945-B.
- Fuente de alimentación variable marca Lab Volt 8821-25.
- Multímetro digital marca BX-TOOL.
- Tacómetro fotoláser marca EXTECH serie 461995.
- Termómetro digital marca EXTECH TM300.
- Microsoft Excel.
- Resistencia de 20 ohm para el ensayo E_h -star.
- Motor de jaula de ardilla marca Lab Volt Series 8221-00.

Parámetros	Valores
Potencia (W)	175
Velocidad nominal (rpm)	1670

Voltaje del Estator (V)	120/208
Corriente nominal (A)	1,2
Frecuencia (Hz)	60
Fases	3
Polos	4
Distribución eléctrica	3 fases, 5 cables, conectado en estrella ("Y"), incluido neutro y tierra
Devanados	Conectados independientemente (6 tomas)

Tabla 9: Características obtenidas del motor de jaula de ardilla LabVolt Series 8221-00. Fuente: (LabVolt_Series)

4.1. Método B del IE IEEE112

La adquisición de datos e implementación de pruebas de laboratorio se rige a los procedimientos básicos de los métodos para la determinación de eficiencia energética de la norma IEEE112.

4.2.1. Condiciones y/o pruebas preliminares

Se refiere a la prueba de resistencia en frío (Ohm) y la temperatura nominal (°C) de las secciones 3.2.1.1 y 3.2.1.2. Cuyos resultados se muestran en las tablas Tabla 10 y Tabla 11,

Temperatura durante la prueba (°C)	22,532
Temperatura max (°C)	23,5

Tabla 10: Resultados de la medida de temperatura durante la prueba con carga. Fuente: Autor.

Torque (Nm)	R_{uv} (Ω)	R_{vw} (Ω)	R_{wu} (Ω)	R Corregida (Ω)
19	1,6	2,07	2,62	1,59
11,85	1,7	1,40	1,14	1,69

Tabla 11: Resultado de la prueba de resistencia del estator en frío. Corresponden a las resistencias durante el torque máximo y nominal de la prueba respectivamente. Fuente: Autor.

4.2.2. Prueba al vacío

Los datos tomados durante esta prueba se muestran en la sección Anexos, Tabla 27.

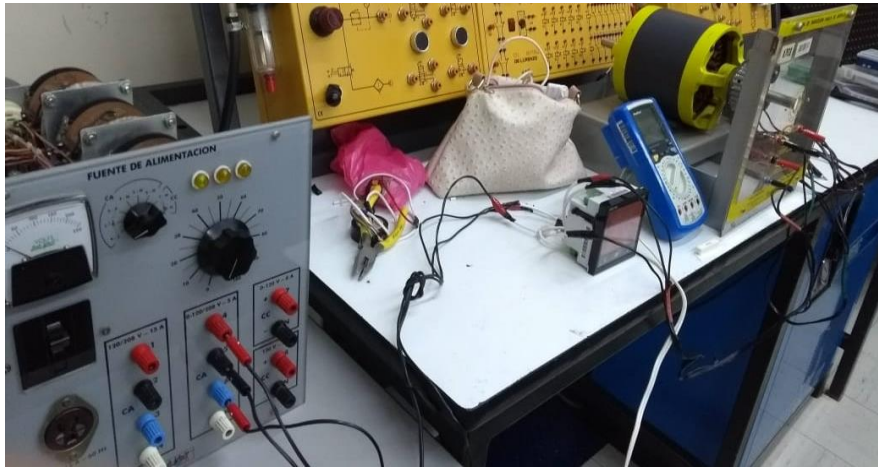


Ilustración 12: Montaje del motor de jaula de ardilla del laboratorio de la USTA para la prueba en vacío de acuerdo al esquema de la Ilustración 5. Fuente: Autor.

4.2.3. Prueba con carga

Los datos tomados durante esta prueba se muestran en la sección Anexos, Tabla 23.

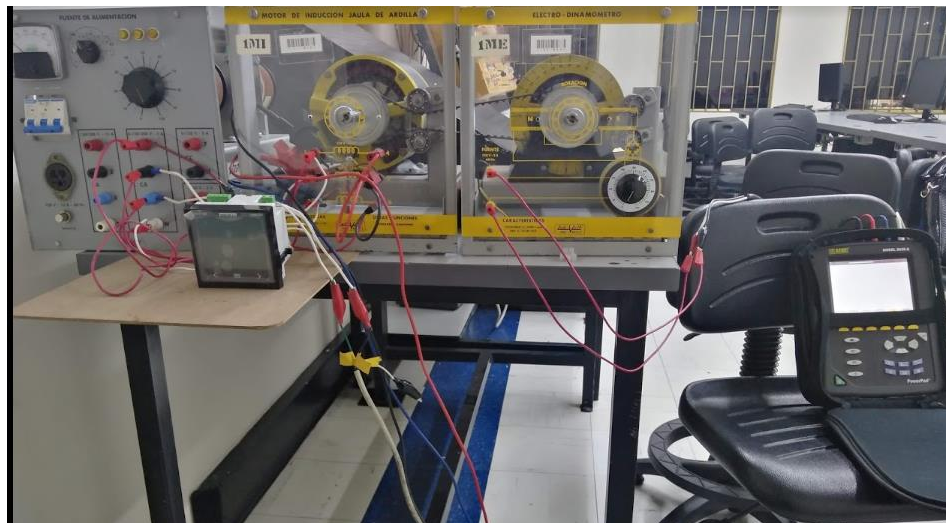
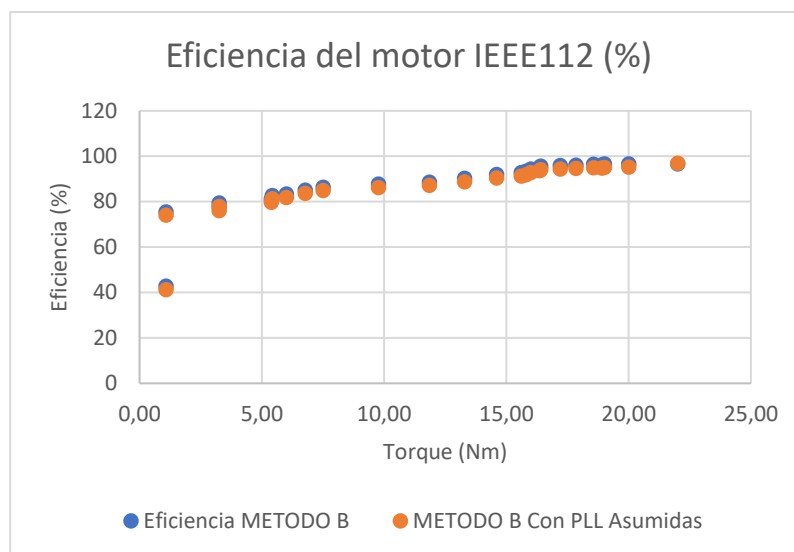


Ilustración 13: Montaje del motor de jaula de ardilla del laboratorio de la USTA para la prueba con carga. Fuente: Autor.

4.2.4. Análisis de la Eficiencia

Por motivos netamente experimentales se decidió calcular la eficiencia haciendo uso de la ecuación 2, por un lado, a partir de las pérdidas aparentes (resta de potencia de salida calculada con el torque o par, dividida en la potencia de entrada) y por otro a partir de las pérdidas totales.

Es preciso reconocer que el método A de EI IEEE112 indica el cálculo de la eficiencia a partir de las pérdidas aparentes, y el método B sería aquel que tiene en cuenta las pérdidas del motor.



*Ilustración 14: Análisis porcentual de la eficiencia del motor según la carga, al aplicar la norma IEEE112:
Fuente: Autor*

La Ilustración 14, compara la eficiencia alcanzada por el motor cuando se tienen en cuenta las pérdidas totales y cuando no. Para el primer caso, el motor alcanza la eficiencia 96.68% a 11.85 Nm del torque nominal. Por otra parte, si se suman las pérdidas calculadas como lo indica el método B de la norma IEEE112, la eficiencia disminuye a 88.71% en el mismo valor del torque. Con lo cual se puede ver que para obtener valores de eficiencia más realistas se hace necesario tener en cuenta las pérdidas del motor en el cálculo de la eficiencia.

Ahora bien, teóricamente el torque nominal se calcula con los valores nominales del motor usado en el laboratorio (LabVolt_Series) con la ecuación 34, esto da como resultado un valor de 11.8483 Nm. En la Ilustración 14 en congruencia, muestra como a partir de este punto los valores de eficiencia se nivelan hasta alcanzar el torque máximo 19Nm y es entonces, durante esta franja [1754- 1786 RPM] que el motor trabaja de manera efectiva y sin riesgo a desgaste y sobre esfuerzos mecánicos o eléctricos, lo que si ocurre cuando el motor supera este límite de rpm.

4.2. Método Eh-star del IE IEC60034-2-1

La adquisición de datos e implementación de pruebas de laboratorio se rige a los procedimientos básicos de la sección 3.3.3.5.2.4.

4.2.1. Condiciones y/o pruebas preliminares

A diferencia de la normativa IEEE112, la norma IEC60034-2-1 no es tan estricta en cuanto a las condiciones preliminares y tampoco exige un orden preciso entre el desarrollo de las pruebas y medidas.

4.2.2. Prueba bajo carga

Los datos tomados durante esta prueba se muestran en la sección Anexos, Tabla 28 y Tabla 29.

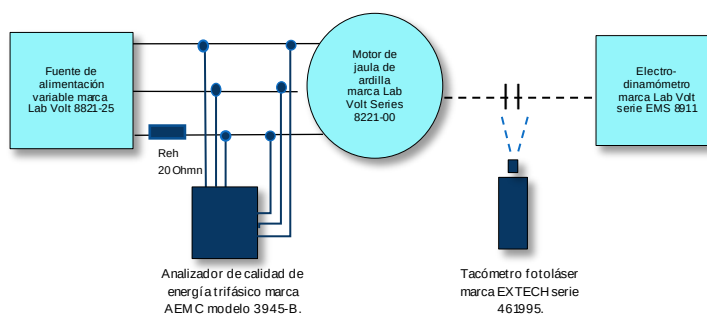


Ilustración 15: Esquema del montaje agregando la resistencia Eh-star de la norma IEC60034-2-1 en la prueba con carga. Fuente: Autor.

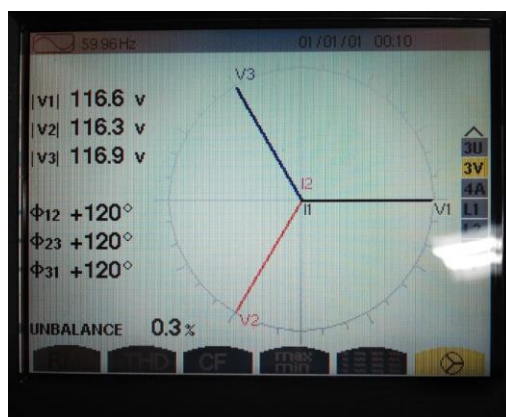


Ilustración 16: Diagrama fasorial del circuito desbalanceado de la prueba Rh-stat con secuencia positiva. Fuente: Autor.

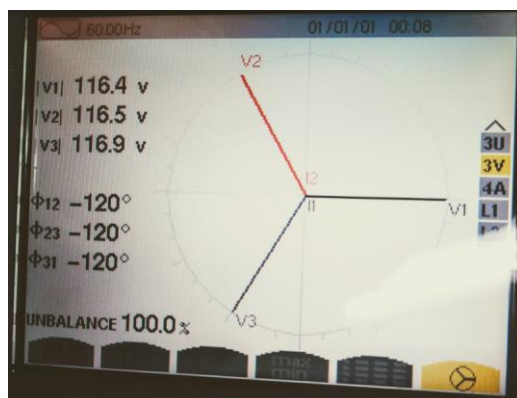


Ilustración 17: Diagrama fasorial del circuito desbalanceado de la prueba Rh-stat con secuencia negativa. Fuente: Autoría propia.

4.2.3. Prueba en vacío

Los datos tomados durante esta prueba se muestran en la sección Anexos, Tabla 27.

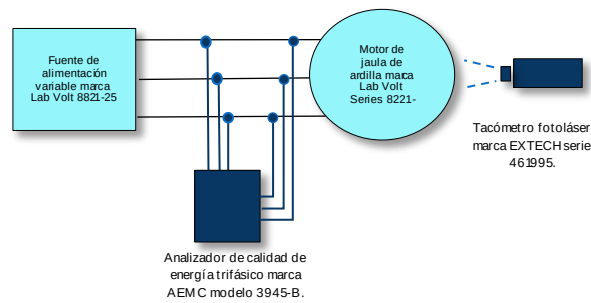


Ilustración 18: Esquema del montaje agregando la resistencia Eh-star de la norma IEC60034-2-1 en la prueba al vacío. Fuente: Autor.

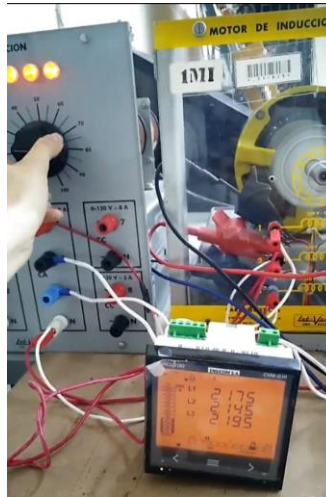


Ilustración 19: Evidencia fotográfica del momento en que se varía el voltaje durante la prueba con la resistencia Eh-star de la norma IEC60034-2-1 en la prueba con carga. Fuente: Autor.

4.2.4. Análisis de la Eficiencia

Al aplicar el método de la resistencia Eh-star de la norma europea IEC60034-2-1 para hallar las pérdidas adicionales del motor, resulta una eficiencia máxima de 106.5% a 19 Nm de torque. Por otra parte, la eficiencia durante el torque nominal se iguala al 66%. Representando hasta el momento el resultado más bajo en cuanto eficiencia del motor.

No sobra decir, que a partir del torque nominal el motor está sobrecargándose y después de los 17,62 Nm de acuerdo a la Ilustración 32, ya representa un riesgo para la vida útil del mismo.

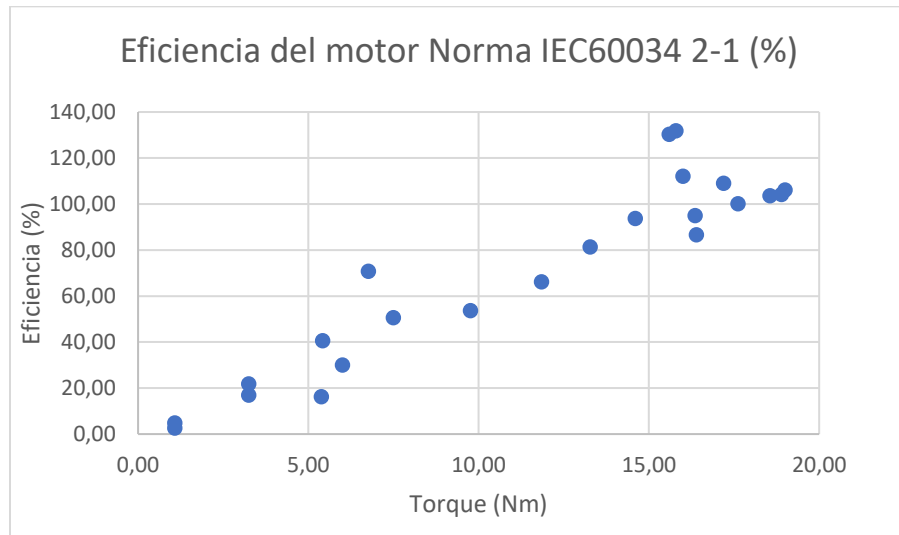


Ilustración 20: Análisis porcentual de la eficiencia del motor según la carga, al aplicar la norma IEC60034-2-1.
Fuente: Autor

4.3. Análisis Comparativo de las Pérdidas del Motor Calculadas con la Norma IEEE112 e IE IEC60034-2-1

Es importante señalar que una coincidencia entre la norma IEEE112 e IE IEC60034-2-1 es que las pérdidas del núcleo, estator y fricción/viento, se calculan a partir de la prueba en vacío. Por otra parte, las pérdidas del rotor y carga parásita se calculan con los datos de la prueba bajo carga.

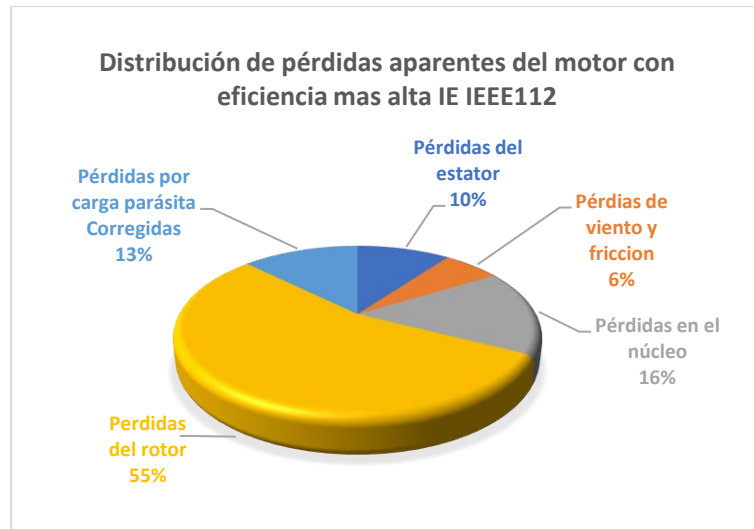


Ilustración 21: Distribución de pérdidas aparentes del motor de jaula de ardilla en máxima eficiencia 98% Método B de la norma IEEE112. Fuente: Autor.

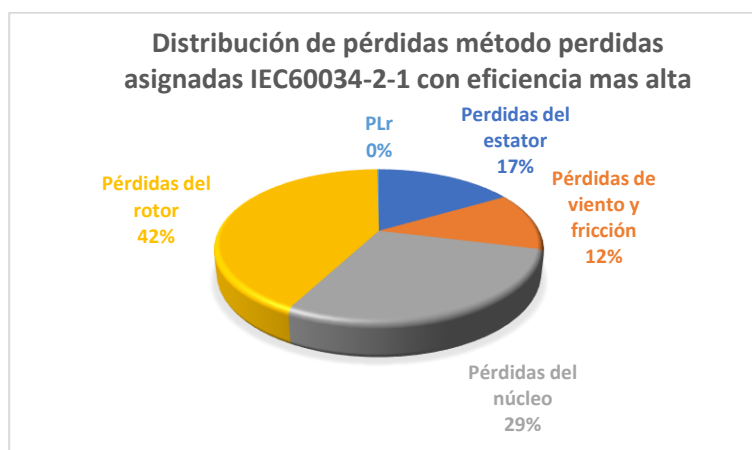


Ilustración 22: Distribución de pérdidas totales del motor de jaula de ardilla durante la prueba R-eh de la norma IEC60034-2-1. Eficiencia máxima 69.04%. Fuente: Autor

4.3.1. Pérdidas por fricción y viento

IEEE112	IEC60034-2-1
Ilustración 23: (Pérdidas totales -pérdidas de Estator) Vs. Voltaje de entrada al cuadrado aplicando el método de IEEE112 en la prueba al vacío. Fuente: Autor De acuerdo a la norma, el resultado de restar las pérdidas totales y las pérdidas del estator se grafica con respecto al voltaje de entrada al cuadrado, se obtiene la Ilustración 23, una recta con tendencia positiva y corte en el eje Y igual a 0.799 valor fijo designado a las pérdidas por rozamiento y viento para todo punto de carga. En este caso de prueba, las pérdidas por fricción y viento son mínimas solo representan el 1% en comparación de las demás pérdidas del motor. Ver Ilustración 21.	Ilustración 24: (Pérdidas totales -pérdidas de Estator) Vs. Voltaje de entrada al cuadrado, aplicando el método de IEC60034-2-1 en la prueba al vacío. Fuente: Autor. Se obtiene la gráfica anterior al realizar un análisis de regresión lineal del sistema trifásico de las pérdidas fijas que son el resultado de la resta de las pérdidas aparentes y las de estator, respecto el voltaje al cuadrado. La pendiente de la gráfica resultante (5.33) se considera el valor por pérdidas de rozamiento y viento. En perspectiva general del total de las pérdidas del motor, solo el 12% equivalen a las pérdidas de fricción y viento con la Resistencia R-eh. Ver Ilustración 22.

Tabla 12: Pérdidas por fricción y viento del motor calculadas de acuerdo al IE IEEE112 e IE IEC60034-2-1. Autor: Fuente.

4.3.2. Pérdidas en el núcleo

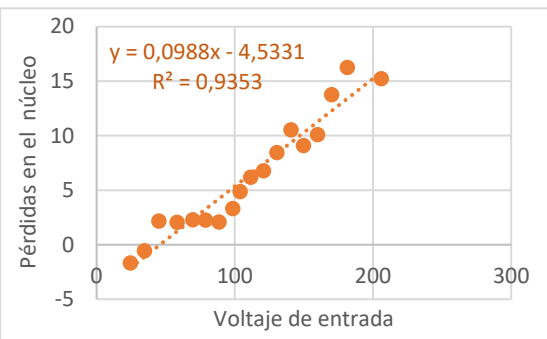
IEEE112	IEC60034-2-1
 Ilustración 25: Pérdidas en el núcleo respecto a la variación del voltaje de entrada del motor de la prueba al vacío. Fuente: Autor De acuerdo a la Ilustración 21, las pérdidas en el núcleo representan el 6% del total. Permanecen constantes ya sea en la prueba de vacío o con carga.	Las pérdidas de núcleo representan el 29% del total de las pérdidas del motor de acuerdo a la Ilustración 22. Es el resultado de restarle a la potencia de entrada, las pérdidas de fricción y viento y el estator.

Tabla 13: Pérdidas en el núcleo del motor calculadas de acuerdo al IE IEEE112 e IE IEC60034-2-1. Autor: Fuente.

4.3.3. Pérdidas del estator

IEEE112	IEC60034-2-1
Las pérdidas de estátor se calculan con las resistencias de línea UV, VW, WU y por tanto se usa la fórmula: $P_{SIR} = 1.5I^2R \text{ [Ecuación 4]}$ I: Corriente de terminal de línea, en amperios. R: Resistencia entre dos terminales de línea cualquiera, corregida en la temperatura ambiente. En ohm. (Temperatura medida durante la prueba fue de 22.53 °C y la máxima de 23°C) De acuerdo a la Ilustración 21 las pérdidas del estator representan el 10% del total.	El cálculo de estas pérdidas es el mismo que se realiza en el método B de EI IEEE112. De acuerdo a la Ilustración 22 las pérdidas de estator representan el 17% del total de pérdidas del motor. Los valores de la corriente y la reactancia se midieron en la prueba con carga y R-eh.

Tabla 14: Pérdidas en el estator del motor calculadas de acuerdo al IE IEEE112 e IE IEC60034-2-1. Autor: Fuente.

4.3.4. Pérdida del rotor

IEEE112	IEC60034-2-1
El valor de las pérdidas del rotor por cada punto de prueba se halla con la ecuación 5. Para hallar el valor del deslizamiento del motor de prueba se tiene en cuenta los valores de la placa como la frecuencia del motor igual a 60 Hz y la cantidad de polos 4. Por tanto, la velocidad síncrona es 1800 rpm. Con los datos de velocidad tomados en la prueba con carga usando el tacómetro, se calcula por cada punto el valor del deslizamiento que varía entre 0,78 y 0.99, los cuales son valores esperados por ser un motor asíncrono. De acuerdo a la Ilustración 21 las pérdidas del rotor representan el 55% del total. Son las más significativas	No existe diferencia alguna con el método B de EI IEEE112 para calcular las pérdidas del rotor. El deslizamiento (S) es la diferencia entre la velocidad síncrona (1800rpm) y la velocidad del estator, estos datos se toman durante la prueba con carga, la velocidad y el deslizamiento del motor disminuye con el aumento de la carga. De acuerdo a la Ilustración 22, las pérdidas en el rotor representan entre el 19% y el 21% del total de las pérdidas del motor en cada línea.

Tabla 15: Pérdidas en el rotor del motor calculadas de acuerdo al IE IEEE112 e IE IEC60034-2-1. Autor: Fuente.

4.3.5. Pérdidas totales aparentes

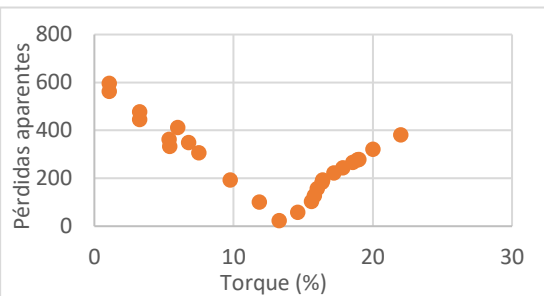
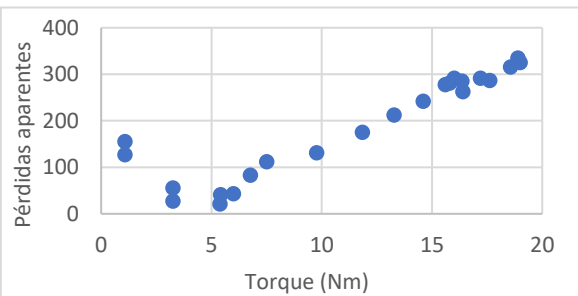
IEEE112	IEC60034-2-1
 Ilustración 26: Relación entre la potencia de entrada y las pérdidas aparentes del motor al aplicar el método IEEE112 en la prueba con carga. Fuente: Autor Estas pérdidas se calculan restando la potencia de salida de la potencia de entrada medidas en watts. Las pérdidas aparentes son casi imperceptibles las en el rango donde el par es más estable, es decir las muestras cercanas a los 11.85 Nm. nominal.	 Ilustración 27: Relación entre la potencia de entrada y las pérdidas aparentes del motor al aplicar el método de la resistencia Rh-stat de IE IEC60034-2-1. Fuente: Autor. El procedimiento para calcular las pérdidas totales aparentes es igual al del método B de IE IEEE112. El resultado en este caso, muestra que las pérdidas aparentes son mínimas en el rango desde los 3.25 Nm hasta 11.85 Nm, es decir, cerca al valor del par nominal disminuyen las pérdidas aparentes en el motor.

Tabla 16: Pérdidas totales aparentes calculadas de acuerdo al IE IEEE112 e IE IEC60034-2-1. Autor: Fuente.

4.3.6. Pérdidas residuales

IEEE112	IEC60034-2-1
El método B de EI IEEE112 indica que para encontrar las pérdidas por carga parasita se debe restar la suma de las pérdidas totales (estator, núcleo, rotor, viento y rozamiento) de las pérdidas totales aparentes por cada punto de carga. Después, un análisis de regresión lineal confrontando las pérdidas de la carga parásita calculadas frente al par o torques al cuadrado.	De acuerdo a IE IEC60034 2-1 las pérdidas residuales se pueden calcular usando: 1. A partir de las pérdidas asignadas A partir de la curva de pérdidas adicionales en función de la potencia útil de la prueba con carga que entrega la norma IEC60034-2-1, se aplicó la siguiente operación para cada punto de carga: $1KW < P. \text{útil} < 10000KW$ $P_{LL} = P_{ab} * 0.025 \text{ [Ecuación 47]}$ Enseguida se grafica P_{LL} respecto al torque al cuadrado. La línea de tendencia es corregida para cruce por 0 y de esta manera se obtienen las pérdidas residuales ya corregidas a partir de las pérdidas asignadas:
Par al cuadrado $y = 0,016x - 0,642$ $R^2 = 0,8916$ $y = 0,0106x$ $R^2 = 0,9153$ PLL • Pérdidas Residuales. Línea de tendencia P. Residuales. Corrección por Par del motor.	Par al cuadrado $y = 5,4231x - 0,5262$ $R^2 = 0,9546$ $y = 4,1145x$ $R^2 = 0,9555$ PLr • Pérdidas Residuales. Línea de tendencia P. Residuales. Corrección por Par del motor.
<i>Ilustración 28: Análisis de regresión lineal de las pérdidas residuales respecto al par del motor al cuadrado. Fuente: Autor.</i> El resultado de este análisis muestra la pendiente positiva (0.016), y el factor de correlación es 0,89 aproximado a 0.9 por tanto, la prueba es satisfactoria. Para corregir estos datos, se debe multiplicar el valor de la pendiente por el torque al cuadrado de cada punto de carga. Para el caso de prueba, las pérdidas residuales ya corregidas representan el 0% del total.	<i>Ilustración 29: Análisis de regresión lineal de las pérdidas residuales respecto al par del motor al cuadrado. Fuente: Autor.</i> 2. Método de la resistencia R-eh Para calcular la resistencia R-eh, se tiene en cuenta que la corriente nominal del motor es 0.2A y el voltaje nominal es 208v; por tanto, se tiene un valor de Resistencia R-eh igual 20.1 Ohmio. Inicialmente las pérdidas residuales se deben calcular a partir de los valores imaginarios:

$$P_{Lr} = k * [(1 - s) * P_{i(1)} - P_{i(2)} - P_{fr}]$$

[Ecuación 86]

Donde:

(S) = Es el deslizamiento del motor.

(P_{fr}) = Se remplaza el valor de 36.36 watts como las pérdidas por fricción y viento.

Los valores de potencia de secuencia positiva ($P_{i(1)}$) y secuencia negativa ($P_{i(2)}$) así como el valor de (k) fueron calculados de acuerdo al procedimiento descrito en la norma IEC60034-2-1 a partir de los datos tomados de la prueba con carga y la R_{eh} .

$$k = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{i(1)}}{I_{i(2)}}\right)^2}$$

[Ecuación 87]

Las pérdidas adicionales resultan del análisis de regresión lineal de la corriente negativa $I_{i(2)}$ respecto a la corriente de prueba I_t al cuadrado, luego se gráfica:

$$P_{LL} = A \frac{I_{i(2)}}{I_t} + B$$

[Ecuación 88]

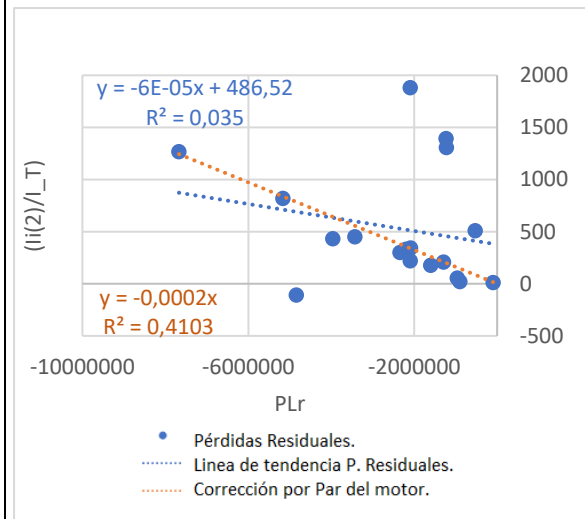


Ilustración 30: Análisis de regresión lineal de las pérdidas residuales respecto a la relación de las Corrientes de secuencia negativa con la corriente de prueba. Fuente: Autor.

Finalmente, las pérdidas se hallan al multiplicar la pendiente de la gráfica P_LR por el torque o par al cuadrado:

$$P_{LL} = A * T^2$$

	[Ecuación 89] La Ilustración 30 es el resultado de los cálculos realizados en la Tabla 35- Sección Anexos aplicando el procedimiento del documento (Bojacá, 2010) consultado como referencia. Al observar la Ilustración 22, en general las pérdidas residuales son nulas en el motor.
--	---

Tabla 17: Pérdidas residuales del motor calculadas de acuerdo al IE IEEE112 e IE IEC60034-2-1. Autor: Fuente.

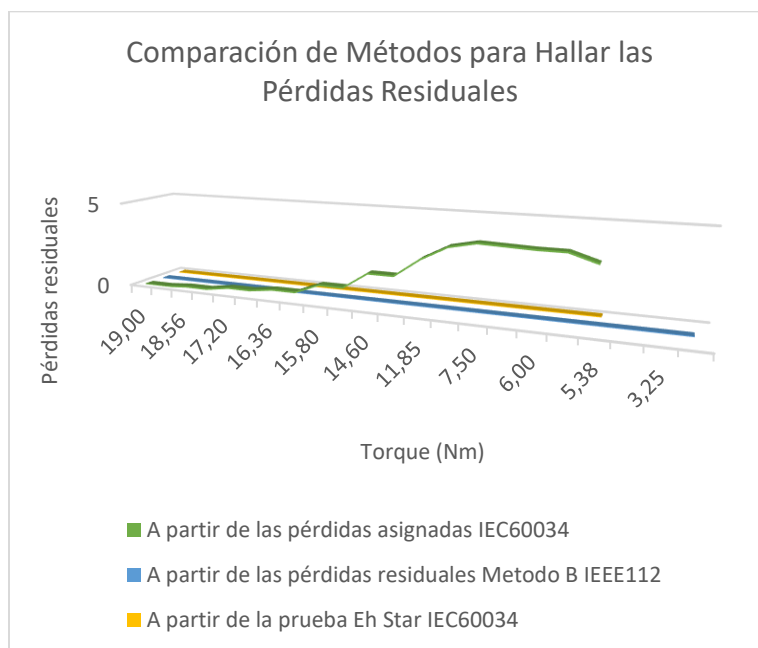


Ilustración 31: Linealización de las pérdidas residuales totales aplicando el método B de la norma IEEE112 y los métodos a partir de las pérdidas asignadas y a partir de la prueba Eh Star de la norma IEC60034-2-1. Fuente: Autor.

El diseño del núcleo del motor debe disminuir las pérdidas residuales, por este motivo se puede ver que todos los valores obtenidos y corregidos de las pérdidas residuales son insignificantes. Tan solo, el método que se encuentra a partir de las pérdidas asignadas de la norma IEC60034-2-1 son en promedio 4 % más indicadoras.

En base a la experiencia al calcular las pérdidas residuales a partir de la resistencia Eh-star- Stat de IE IEC60034-2-1, se llega a la conclusión que es más practico utilizar el método de pérdidas asignadas, debido a que los cálculos a partir de la resistencia Eh-star incluyen lecturas de las potencias y corrientes de secuencia positivas y negativas de las fases que alimentan al motor que requieren de un analizador de calidad que es costoso y debe ser cuidadoso en el momento de adquisición de datos.

Por otra parte, si no cuenta con este instrumento y quiere aplicar el método Eh-star, se pudo comprobar que aplicando el procedimiento del documento (Bojacá, 2010) consultado como referencia, es posible calcular la potencia de secuencia negativa y positiva a partir de los valores rms de corriente, voltaje, resistencia de las 3 fases de alimentación del motor. Sin embargo, es un método

más complejo y que requiere bastante atención y tiempo. Los resultados de estos cálculos fueron los que se usaron para calcular las pérdidas residuales de la Tabla 17 sección IE IEC60034-2-1. (Se presentan en el Anexo O).

5. Diseño de Metodología y Análisis de Resultados

Este capítulo se desarrolla el objetivo específico del proyecto que solicita diseñar un modelo para evaluar la eficiencia de un motor de jaula de ardilla a partir del estudio comparativo de las normas IEEE112 e IEC60034 2-1.

Se dividirá en primer lugar, explicar las bases sobre la que se crea dicha metodología (Sección 5.1). A continuación, se indicarán los pasos específicos que la componen (Sección 5.2) y se describirá los elementos de la simulación sobre la que se evaluó la nueva metodología propuesta (Sección 5.3). Por último, se presentará el análisis de resultados de la simulación de la metodología propuesta para la evaluación de eficiencia energética en motores de jaula de ardilla (Sección 5.4).

5.1. Presentación

Llegados a este punto del proyecto se plantea la necesidad de corroborar la exactitud y precisión de los resultados obtenidos de los métodos de las normas IEEE112 e IEC60034 2-1, en referencia a la forma tradicional en que se calcula la eficacia energética en motores. Por tanto, se selecciona la norma internacional IEEE1459 del 2010 (Sección 3.4 de este documento), ya que brinda un innovador método para la medición de la cantidad de potencia eléctrica en un sistema trifásico en condición no sinusoidal o armónica y que servirá como referente de la exactitud y precisión de los resultados.

En resumen, la metodología que se propone para la evaluación de eficiencia energética en motores de jaula de ardilla, consiste en medir la potencia trifásica de entrada al sistema, igual que la potencia de salida del motor, usando los parámetros de la norma IEEE1459-2010. A continuación, a esta potencia aparente eficaz, restarle las pérdidas del motor (IEEE112 e IEC60034-2-1) y calcular un valor de eficiencia más realista y confiable que el que se obtuvo hasta ahora.

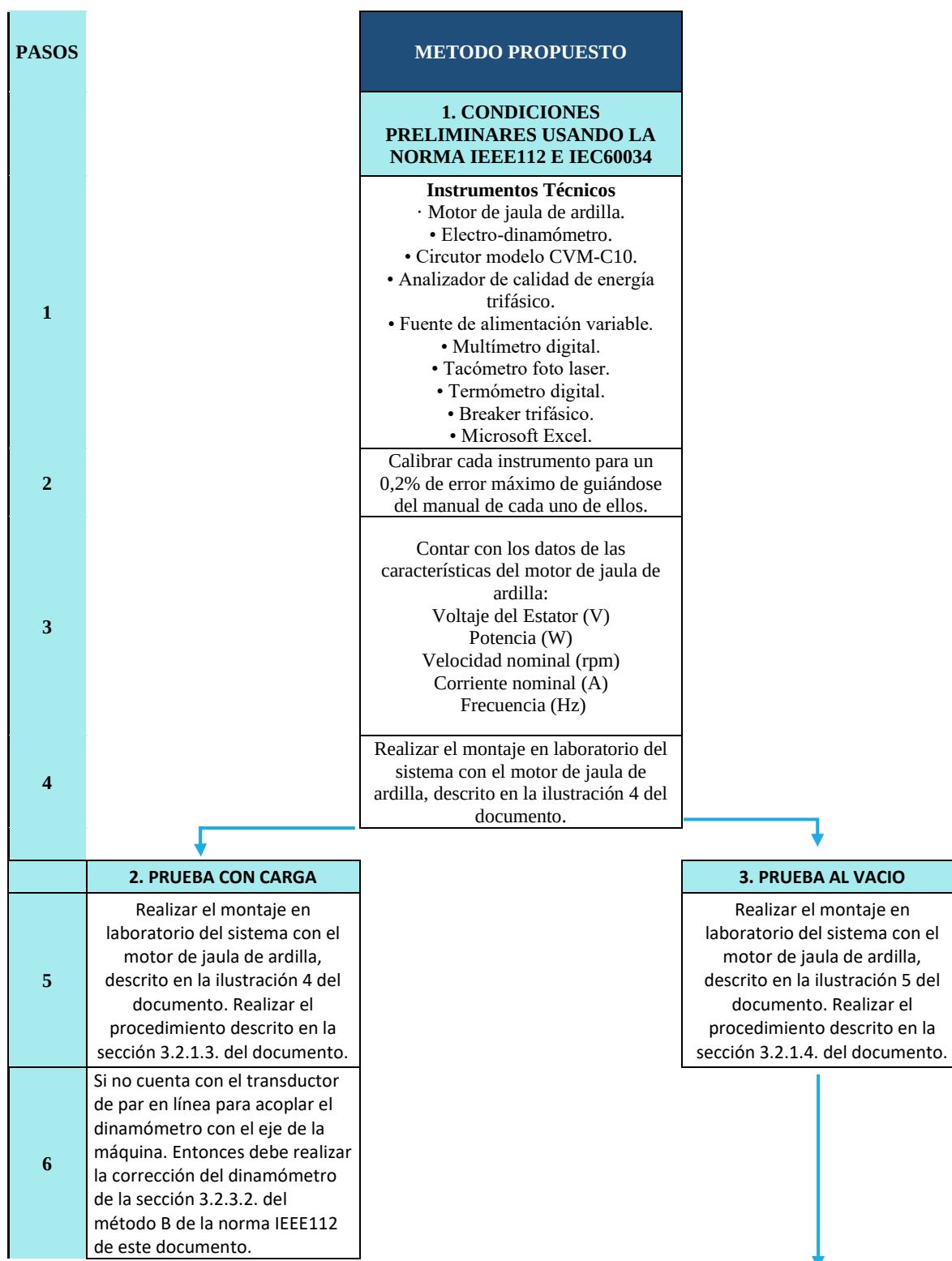
Para finalizar se compara la medición de eficiencia realizada a partir del método B de IE IEEE112 y el método Rh_stat del IE IEC60034 con la metodología propuesta poniendo la norma IEEE1459 como un indicador de la eficiencia del sistema que ayude a evaluar/medir el éxito de las metodologías aplicadas.

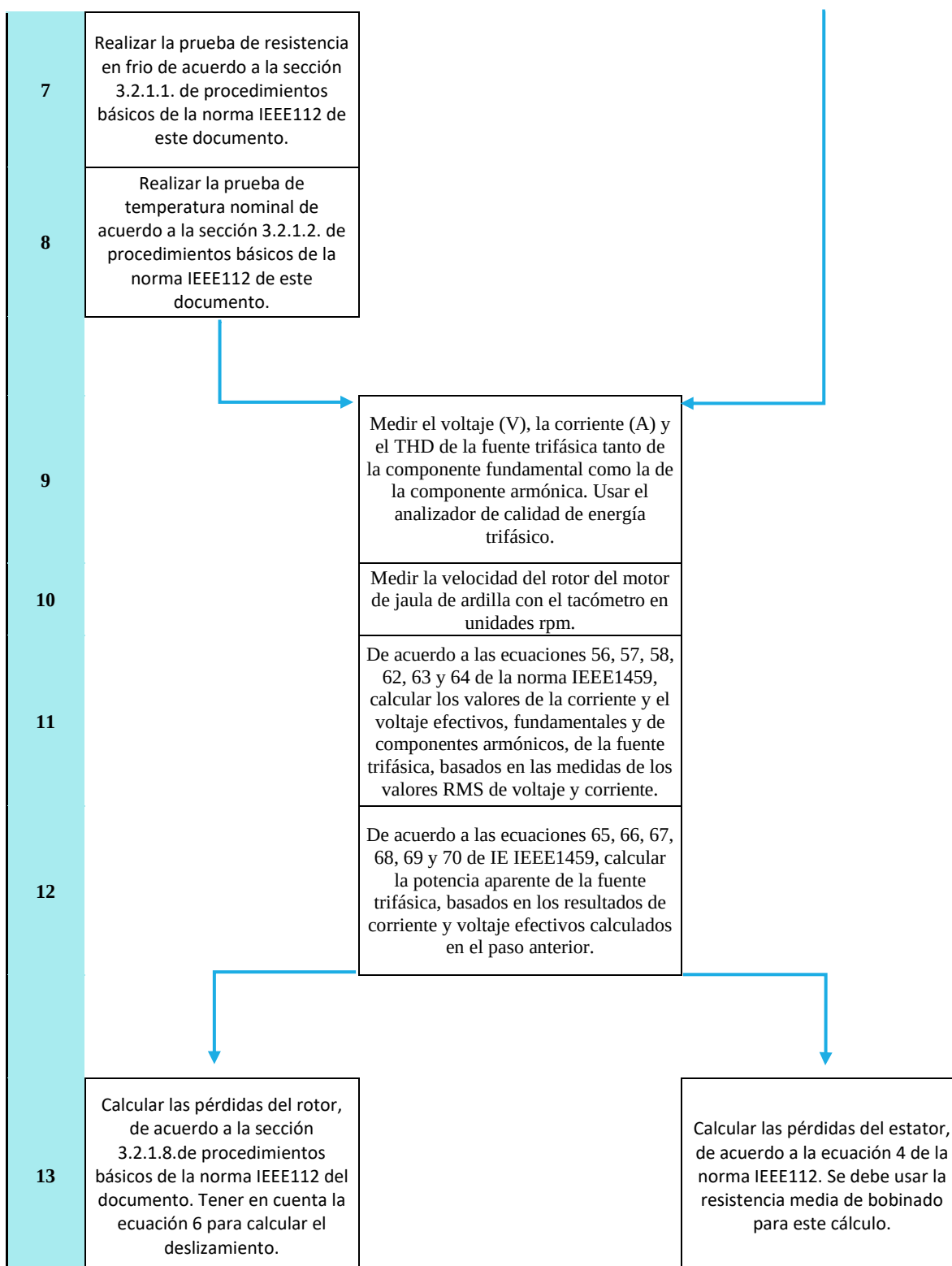
5.2. Esquema Procedimental de la Metodología

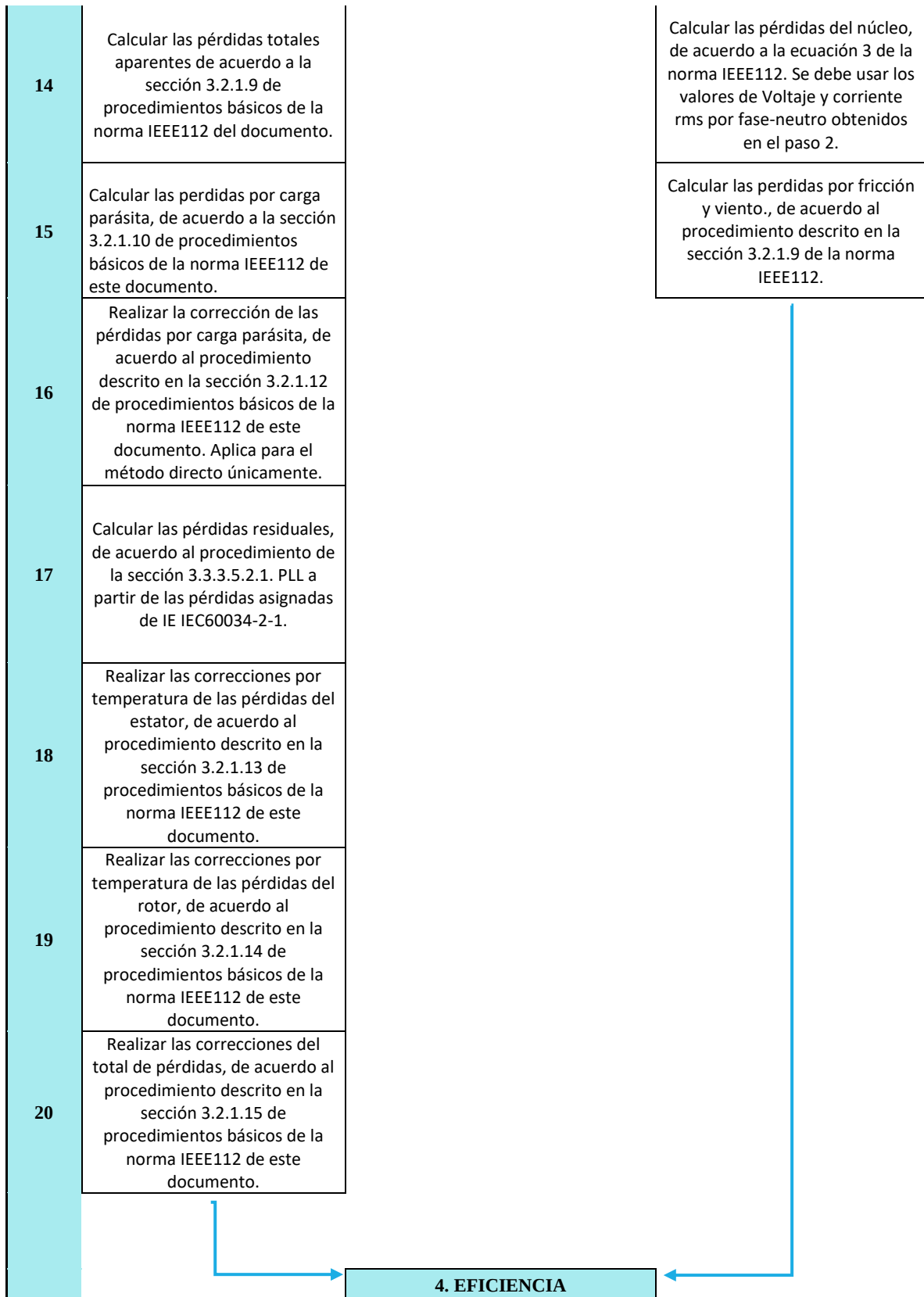
De la misma manera que se explica las pruebas del laboratorio del capítulo 4 del documento, la metodología que se propone para la evaluación de eficiencia energética en motores de jaula de ardilla sigue el flujograma de la Ilustración 11. Solo que además se describe el paso a paso en cada caso.

Las pérdidas residuales se calculan a partir del método *PLL a partir de las pérdidas asignadas* (Sección 3.3.3.5.2.1) definido por el IE IEC60034-2-1. El cálculo de las demás pérdidas del motor

se calcula en base a la norma IEEE112 (Sección 3.2.1). La potencia aparente de entrada se calcula como lo define el estándar IEEE1459-2010 (Sección 3.4.1.1).







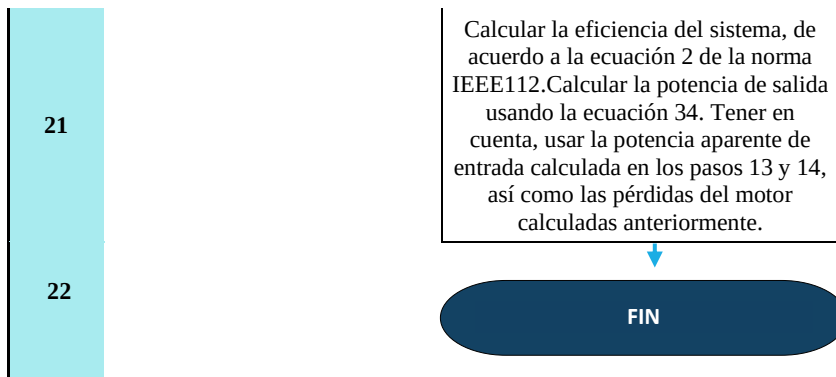


Tabla 18: Metodología para la evaluación de eficiencia energética en motores de jaula de ardilla validada en simulación a partir las normas IEEE112, IEC60034-2-1 e IEEE1459-2010. Fuente: Autor.

Igualmente, se considera que una metodología funcional, debe poder aplicarse también a una prueba de laboratorio real. Por lo que, en complemento, se plantea el siguiente procedimiento de la Tabla 36 en Anexos P.

5.3. Simulación de la Metodología

En base a la prueba con carga y el circuito sobre el que se realizaron las pruebas de laboratorio (Capítulo 4) se crea una simulación en Matlab, conformada principalmente por una fuente de voltaje trifásica programable, con su respectivo medidor de tres fases de voltaje y corriente, la cual alimenta la máquina asíncrona trifásica configurada como motor con rotor de jaula de ardilla. También, se adicionan analizadores de potencia instantánea activa y reactiva trifásica, así como, medidores de valor RMS y THD para corriente y voltaje. Por último, se añaden analizadores de secuencias para medir la corriente y voltaje de la componente fundamental y de los armónicos.

De la norma IEEE60034 se entiende que la eficiencia de una máquina asíncrona se puede determinar de manera directa o indirecta. Así pues, en la metodología que se propone es de medición indirecta de la eficiencia, ya que las pruebas se realizarán sobre una simulación del circuito equivalente del motor de jaula de ardilla.

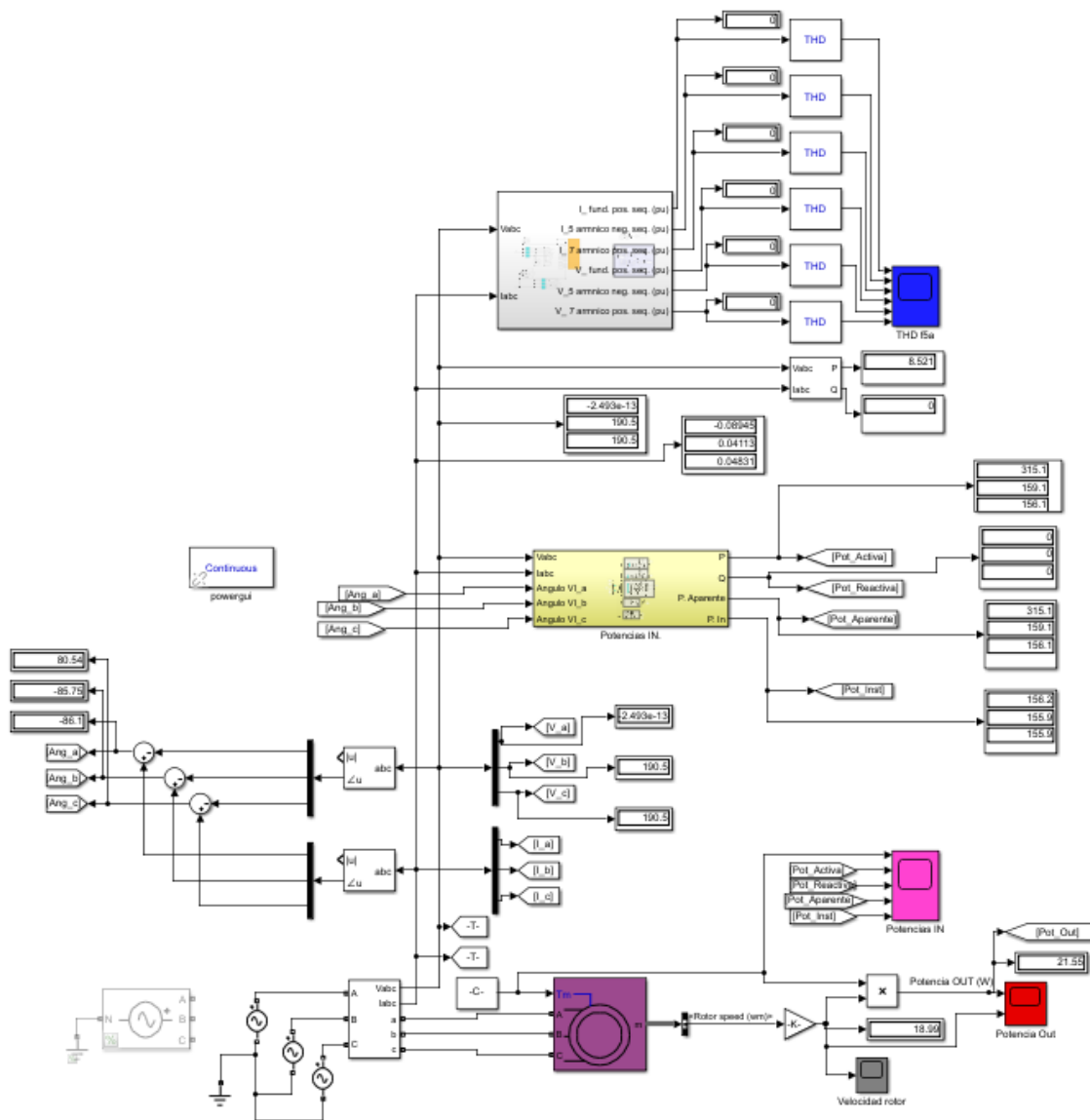


Ilustración 32: Diagrama de bloques creado en simulink que representa un sistema trifásico del motor síncrono Lab Volt 8221-00. Fuente: Autor

5.3.1. Descripción de bloques en simulink

5.3.1.1. Fuente de voltaje con armónicos

Al igual que la red trifásica real colombiana, se configura con un valor de 220v línea a línea, sin desfase y a 60 Hz. También, se selecciona la opción para generar 2 señales fundamentales y/o de armónicos, los parámetros de estos se establecen sabiendo que la mayoría de la distorsión real en la salida sinusoidal de una máquina síncrona es provocada por las frecuencias de los armónicos quinto y séptimo (Chapman, 2012) y teniendo en cuenta que la norma IEEE1459 determina que la amplitud de los armónicos no debe superar el 5% del valor de THDV y por consiguiente se conserva un error menor al 0,15% para cualquier valor de THDI.

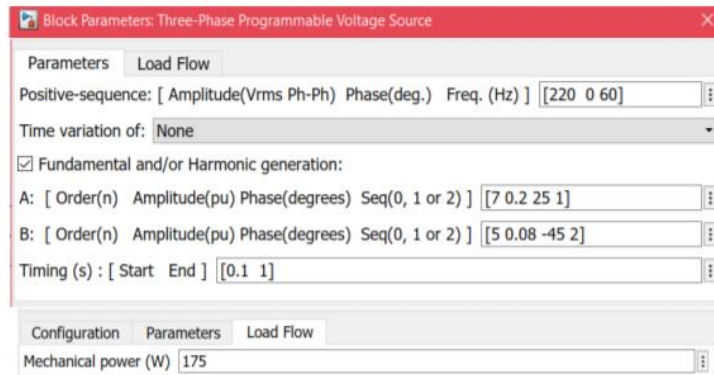


Ilustración 33: Parámetros de la fuente de voltaje trifásica configurada con los armónicos 5 y 7. Fuente: Mathworks, power_3phsignalseq

5.3.1.2. Asynchronous Machine

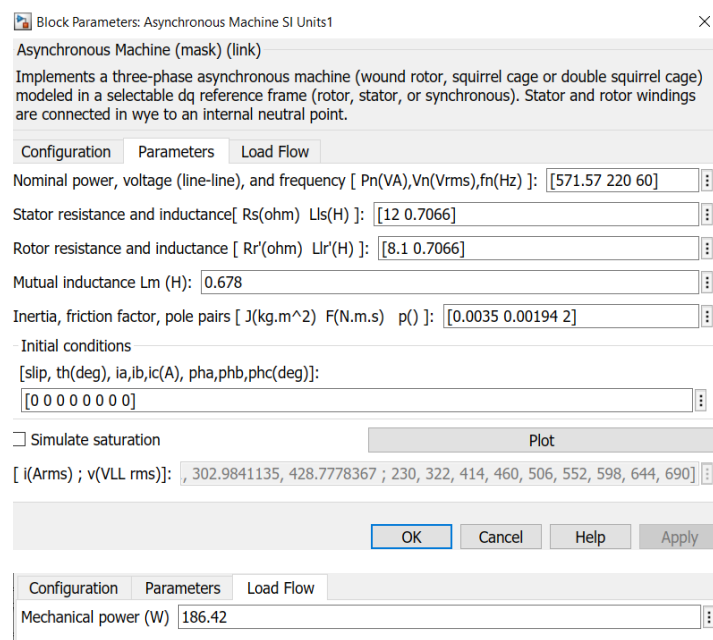


Ilustración 34: Parámetros de la máquina asíncrona configurada con rotor de jaula de ardilla. Fuente: (LabVolt_Series)

Este elemento representa una máquina asíncrona que se puede configurar como generador o motor. Seleccionada esta última opción, se elige el tipo de rotor de jaula de ardilla y como entrada mecánica, el Torque o par motor en Nm. Igualmente, El bloque exige especificar la potencia aparente nominal del motor, para lo cual se usa $la_{Pu}=TW$ [Ecuación 34] incluyendo los valores de voltaje y corriente nominal del mismo. Da como resultado 571.57VA. Por último, los parámetros del circuito equivalente referidos al rotor se extraen de la publicación “The squirrel-cage induction motor model and its parameter identification via steady and dynamic tests” a partir del circuito equivalente de un motor eléctrico con valores nominales similares a los del motor de jaula de ardilla referencia LabVolt Series 8221-00.

Parámetros	Valor
Voltaje de estator (V)	127/220
Potencia (W)	186.42
Velocidad nominal (rpm)	175
Corriente nominal (A)	1.5
Frecuencia (Hz)	60

Tabla 19: Características obtenidas del motor Siemens ILA7 090-2YC60. Fuente: (Onofre A. Morfín1, 2012)

5.3.1.3. Analizador de secuencias

Tres analizadores de secuencia son usados para medir el voltaje y otros para medir la corriente de la secuencia positiva de la componente fundamental, la secuencia negativa del quinto armónico y la secuencia positiva del séptimo armónico de la fuente trifásica de voltaje. Incluyendo los valores de los ángulos se ingresan a un Scope que permite la exportación de los datos a un archivo tipo .xls.

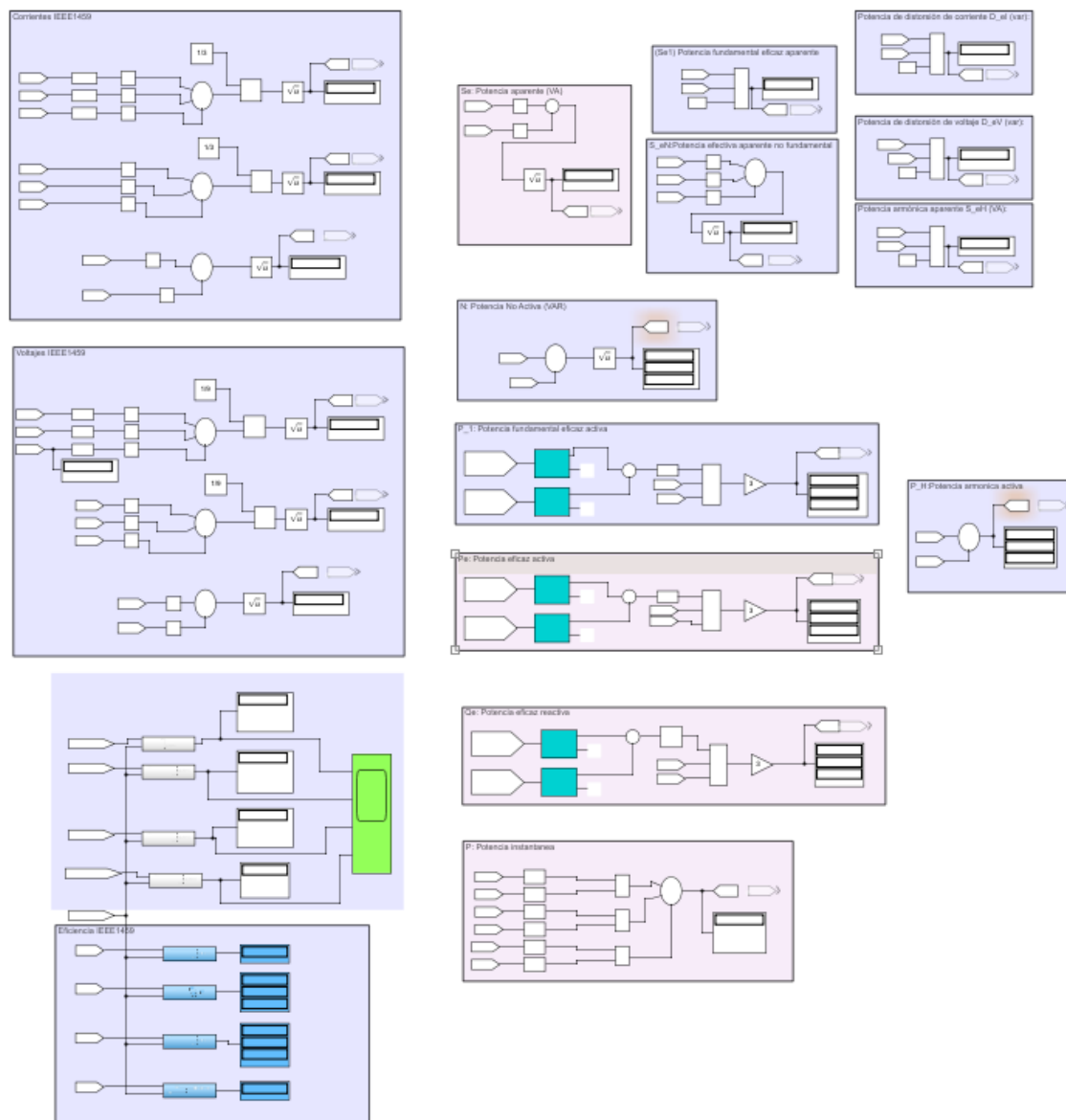


Ilustración 35: Diagrama de bloques de los cálculos de corrientes y voltajes fundamentales potencia aparente, activa, reactiva instantánea y eficiencia de IE IEEE1459 para aplicar la nueva metodología propuesta. Fuente: Autor

5.4. Análisis de Resultados de la Simulación Aplicando la Norma IEEE1459

A continuación, en la sección 5.4.1, se muestra el resumen de los datos obtenidos de la metodología probada en simulación del sistema trifásico con fuente afectada por los armónicos 5 y 7. Se analizan los efectos de los mismos en la eficiencia del motor.

Por otra parte, en la sección 5.4.2 se expone una comparación entre la metodología propuesta (De ahora en adelante nombrada como método IE IEEE1459 con pérdidas del motor – Simulación) y los datos experimentales obtenidos del método B del IE IEEE112 y Eh-star del IE IEC60034-2-1. También se compara con los datos de eficiencia obtenidos tan solo aplicando la norma IEEE1459 sin agregarle las pérdidas del motor y finalmente con el método general o tradicional para el cálculo de la eficiencia energética en motores.

5.4.1. Efectos de los armónicos en la fuente

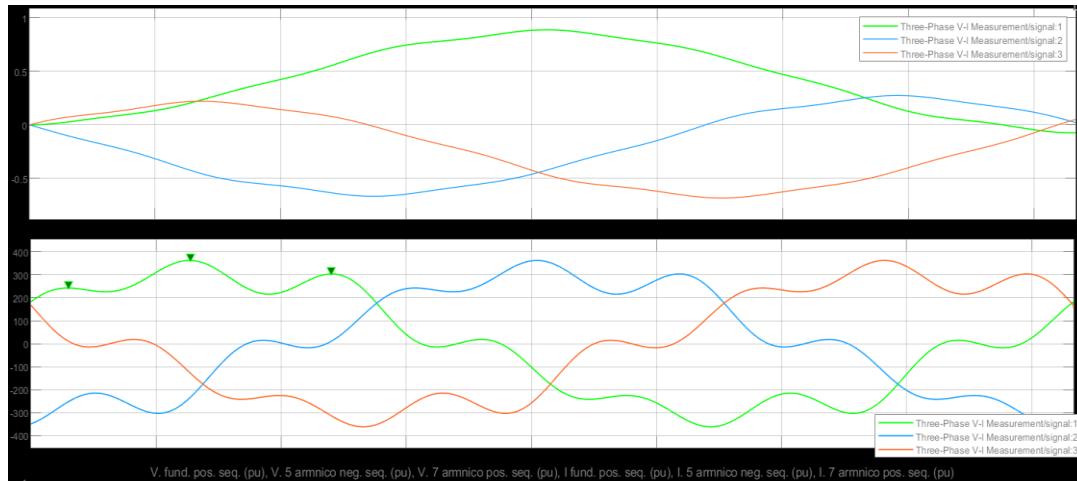


Ilustración 36: Simulación del voltaje a través del tiempo de la fuente Three-Phase Programmable Voltage distorsionada con componentes armónicos de 5to y 7mo orden. Fuente: Autor.

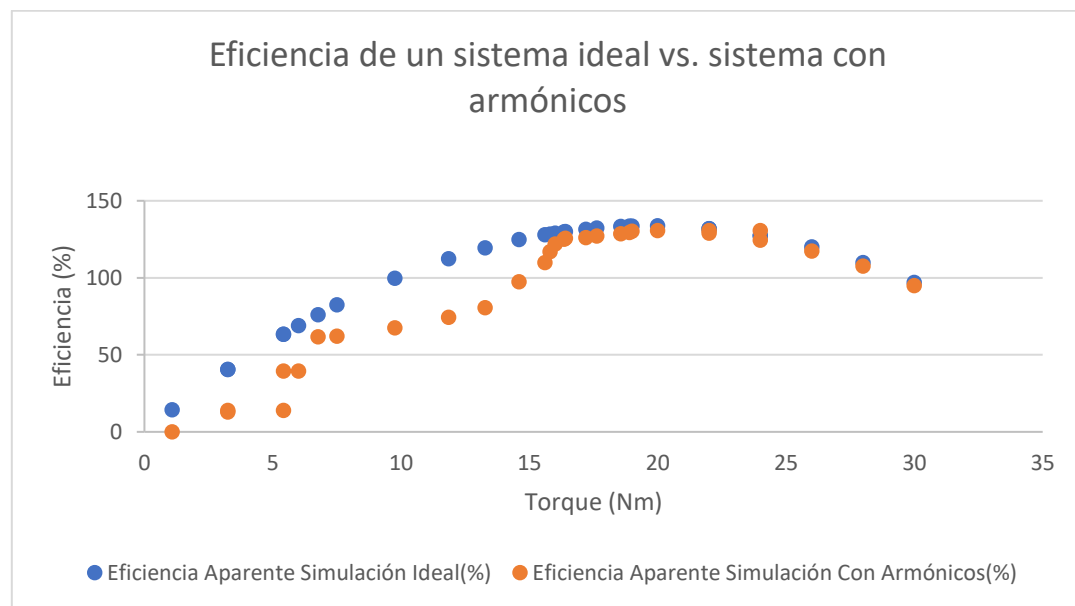


Ilustración 37: Comparación de la eficiencia aparente obtenida de la simulación del sistema balanceado vs. Sistema trifásico con la fuente distorsionada por armónicos de orden 5 y 7 en la fuente. Cálculos de acuerdo a la norma IEEE1459. Fuente: Autor

El principal efecto que producen los armónicos de secuencia inversa en tensión como el quinto armónico, es generar un campo giratorio de sentido contrario de la componente fundamental, y por tanto hará de freno sobre el motor. Este efecto se logra ver en la primera mitad de la Ilustración 37, ya que, desde los 16 Nm de torque, las pérdidas de eficiencia en el sistema con distorsión armónica es 38.97% superior a la eficiencia promedio del sistema ideal.

Sin embargo, en general en ambos casos resulta un valor aceptable de eficiencia y se debe a que la simulación sigue siendo un sistema teóricamente balanceado e ideal. Esta tendencia lo

rectifica el valor de distorsión armónica de voltaje de la fuente (THDV) que se puede revisar en la Tabla 30, este valor es en promedio igual a 0,0000000149012%.

Por otro lado, los armónicos de secuencia directa en tensión sobre los motores, como el caso del séptimo armónico generan un campo giratorio en el mismo sentido de la componente fundamental, que provoca la aceleración del motor.

El resumen, dependiendo de la cantidad de armónicos que se identifiquen distorsionando la potencia que entrega la fuente, la eficiencia final del sistema disminuye igualmente.

5.4.2. Resultado de eficiencia a partir de la norma IEEE112, IEC60034-2-1 y adicionando la IEEE1459.

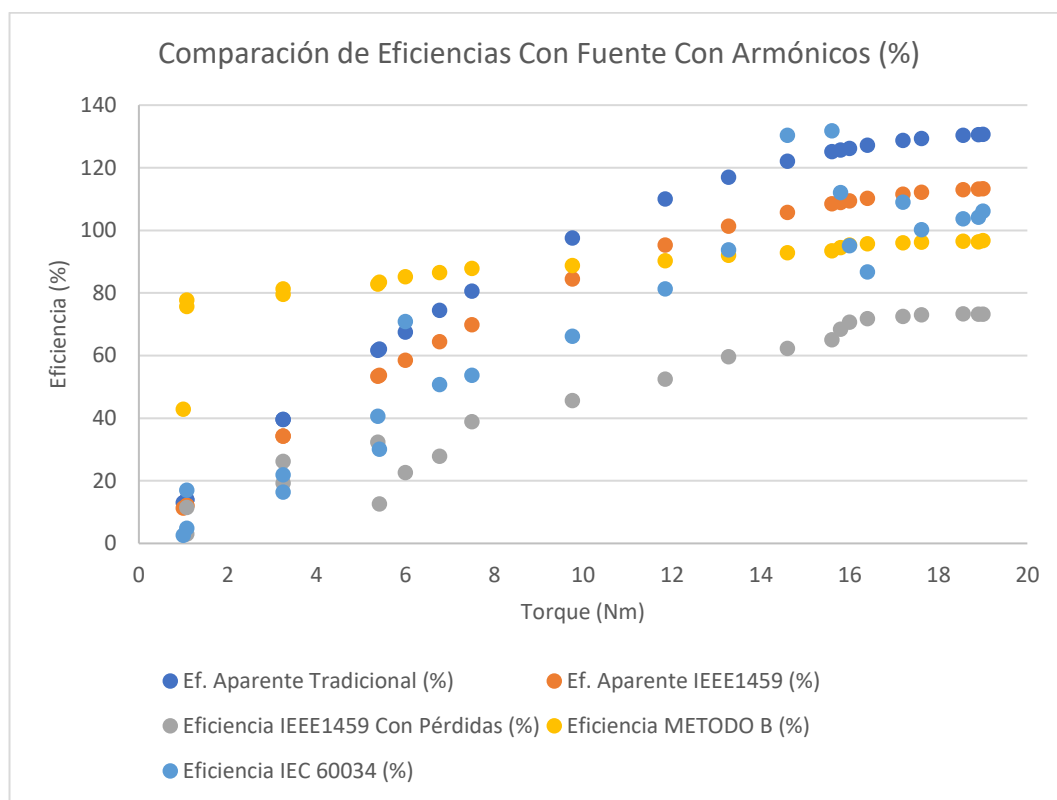


Ilustración 38: Grafica general comparativa de la eficiencia calculada por diferentes métodos. Fuente: Autor

El método tradicional para el cálculo de eficiencia es aquel aceptado en general y usa la ecuación 1,

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ de\ salida}{Potencia\ de\ entrada} [Ecuación\ 1]$$

El método IEEE1459 se calcula con base a las ecuaciones 65, 66, 67, 68, 69 y 70 del documento para calcular la potencia aparente de la fuente trifásica y con este valor encontrar la eficiencia del motor conforme a la ecuación 1.

El método IEEE1459 Con pérdidas, es decir el método que se propone, sigue el procedimiento de la tabla 18 y usa la ecuación 2 para el cálculo de la eficiencia.

A groso modo, se puede ver que el método IEEE1459 puede ser el punto medio entre los resultados de la IE IEEE112 e IE IEC60034-2-1 y la forma tradicional para calcular la eficiencia.

Para la interpretación de la Ilustración 38 se evalúa el porcentaje de eficiencia resultante cuando se ingresa el valor de torque máximo 19 Nm y se presenta en la Tabla 20,

Método para la evaluación de eficiencia energetica	Porcentaje de eficiencia	Porcentaje error referente al Método IE IEEE1459 - Simulación
Método Tradicional - Simulación	130,63%	
Método IE IEEE1459 - Simulación	113,23%	13,32%*
Método IE IEEE1459 con pérdidas del motor - Simulación	73,14%	35,40%
Método B de IE IEEE112 - Experimental	96,68%	14,62%
Método Rh-stat IE IEC60034-2-1 - Experimental	106,15%	6,25%

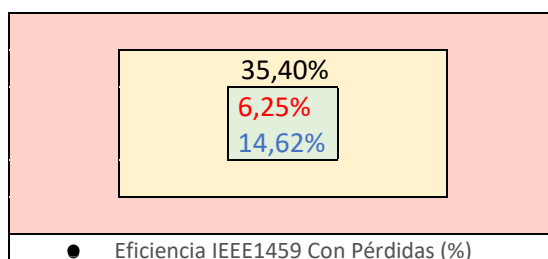
Tabla 20: Relación de resultados con torque de 19 Nm del sistema de fuente de distorsión armónica simulada.

*Únicamente este valor tiene por referente el método tradicional – Simulación. Fuente: Autor.

Comparados entre sí, se logra ver que a excepción del método propuesto y el método B de IE IEEE112, todos los demás arrojan valores de eficiencia imposibles para un motor en realidad. Y teóricamente se debe a que ambos métodos tienen en cuenta las pérdidas del motor, pero solo el método propuesto considera la naturaleza de la potencia de entrada que finalmente es un factor que logra impactar en el cálculo de la eficiencia real. En este caso logra disminuir significativamente (35.40%) la eficiencia final.

Como análisis final, para evaluar la confiabilidad de los resultados de las metodologías aplicadas, se calcula el error porcentual (Measures, 2012) de los resultados de la eficiencia de la

Tabla 20, tomando como dato teórico el método IE IEEE1459 – Simulación y como datos experimentales los resultados de eficiencia del método B de IE IEEE112, método Rh-stat IE IEC60034-2-1 y por último la metodología que surge a partir de estos últimos, método IE IEEE1459 con pérdidas del motor – Simulación.





*Ilustración 39: Diagrama representativo de la exactitud y precisión de la eficiencia calculada por cada método visto a lo largo del documento. *Revisar Nota. Fuente: Autor.*

** Nota: (Measures, 2012) Error de medida: diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia. Exactitud: proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando. Precisión: Proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas.*

La Ilustración 39 distribuye el valor de error porcentual en tres zonas porcentuales. Se interpretan los datos como exactos y precisos si se encuentran en el centro o la primera tercera parte del total de datos [1%-33.33%], exactos e imprecisos si se encuentran en la zona amarilla [33.33% – 66.66%] e inexactos e imprecisos si se encuentran en la zona roja [66% - 100%].

Por tanto, Los métodos B de IE IEEE112 y Eh-star de IE60034 se consideran exactos y precisos y la metodología IEEE1459 Con Pérdidas (%) es exacta pero imprecisa. En general, ningún método es inexacto ni impreciso.

6. Impacto Social

El desarrollo de una metodología que evalúa la eficiencia de máquinas industriales que además está basada en procedimientos aceptados nacional e internacionalmente permite la evaluación y clasificación de eficiencia basándose en una simulación en Matlab que revelar indicadores más reales, confiables y parametrizables, como una solución práctica si no se cuenta con un laboratorio certificado para las pruebas.

Adicionalmente, de acuerdo al uso racional de energía del plan de eficiencia energética que presenta el gobierno colombiano, se destaca, que las técnicas a implementar conllevan beneficios tanto ambientales como económicos. Beneficios ambientales, ya que, al crear un diagnóstico de estado energético correcto a partir de una evaluación confiable y la implementación de alguna solución propuesta, se garantiza la reducción del gasto de recursos energéticos y pérdidas de energía del motor analizado. En segundo lugar, podrían acarrear beneficios económicos, pues la generación, suministro y consumo de energía eléctrica en un país en vía de desarrollo como Colombia son actividades que agregan un alto porcentaje al crecimiento económico del país, exactamente el 62% del PIB (Valencia, 2016).

7. Trabajo Futuro

El contenido del proyecto indica claramente una metodología para la evaluación de eficacia energética de un motor con rotor de jaula de ardilla en simulación de Matlab. En complemento, se deja un segundo flujograma con el procedimiento planteado en la Tabla 36 para que la metodología aquí propuesta también sea aplicada en un laboratorio. Igualmente, se espera realizar más pruebas sobre motores de potencias más altas para realizar un banco de datos de pruebas a consultar.

Potencialmente, se hace necesario plantear alternativas de mejora de la eficiencia energética de los motores de inducción a partir de la disminución de las pérdidas o a partir de la mejora del factor de potencia para que se acerque al valor unitario, en otras palabras, lograr que toda la energía se transforme en trabajo útil. Con lo cual se disminuirían las pérdidas por caídas de voltaje ocasionadas por calentamiento.

Para tener en cuenta, las pérdidas en el motor son determinantes en el rendimiento del motor, por lo cual si se disminuyen mejorará la eficiencia del mismo. En la literatura del motor eléctrico se plantean varios métodos para este fin. Por ejemplo, al ampliar el área en que se disponen los conductores del estator, se reducen las pérdidas del estator. Por otra parte, si se reduce el distanciamiento entre el estator y el rotor se obtienen menores pérdidas por dispersión y si se mejora el material conductor en las barras y en los anillos del rotor, se reduce las pérdidas en el mismo.

En cuanto a las pérdidas en el núcleo, estas dependen del material o barniz aislante eléctrico de las láminas finas del núcleo, entre más separadas estén, se reducen las corrientes parasitas o de Foucault que representan pérdidas igualmente.

8. Conclusiones

- Finalmente, se puede concluir que el valor de eficiencia del motor tiene 25.41% de error entre ambos métodos comparados (IEEE112 e IEC60034-2-1), alcanzando un 88.76% como eficiencia nominal y 96.68% como máximo.
- En cuanto a los resultados obtenidos de la comparación de normas IEEE112 e IEC60034-2-1, se concluye que las pérdidas residuales calculadas por el método de las pérdidas asignadas y el método de la resistencia Eh-star de IE IEC60034-2-1, así como por el método B de EI IEEE112 resultan valores muy cercanos, por lo que el porcentaje de estas pérdidas en la distribución general de las pérdidas no cambia, ambas son 0%.
- Se logró evidenciar que los valores mínimos de pérdidas totales ocurren en el momento de torque nominal y así mismo se encuentra la eficiencia nominal. Por otra parte, cuando se fuerza el motor a más revoluciones por minuto, se encuentra mayor consumo de la potencia de entrada, más generación de calor y pérdidas totales, así como desgaste mecánico.
- Con las pruebas experimentales realizadas a lo largo del proyecto, se logra ver que en primer lugar la eficiencia estimada usando el estándar IEEE1459 sin pérdidas, disminuye un 13.33% con respecto al método tradicional; se debe a que la norma toma en cuenta que la potencia de entrada al motor se ve afectado por armónicos en la fuente que finalmente es energía ineficiente y es el comportamiento más realista que el que se calcula con el método tradicional, y es por esta razón que es más asertivo tomar los resultados de la norma IEEE1459 como índice de éxito de eficiencia del motor de jaula de ardilla.
- La metodología diseñada *IEEE1459 con pérdidas – Simulación*, para la estimación y análisis de eficiencia energética arrojó resultados de eficiencia del motor satisfactorios (73.14%), respecto a las metodologías implementadas en las pruebas de laboratorio (IEEE112 con 88.76% e IEC60034-2-1 con 69.04%).
- Se pudo comprobar que las metodologías B de IE IEEE112 y Eh-star de IEC60034-2-1 son exactas y precisas con referencia tanto de la metodología *IEEE1459 con pérdidas – Simulación*, como de la metodología tradicional del cálculo de la eficiencia energética de un motor (Ecuación 2).
- La metodología propuesta *IEEE1459 con pérdidas – Simulación*, tiene un error porcentual de la eficiencia nominal de 35.40% con respecto a la misma norma IEEE1459, pero sin pérdidas. Es un resultado aceptable y esperado, pues ciertamente si se tienen en cuenta más factores de pérdidas en el sistema, la eficiencia a la par disminuirá. En general, ninguno de los métodos aplicados a lo largo del documento es inexacto ni impreciso.
- Este proyecto sirvió como prueba de que es posible realizar una auditoría de eficiencia de un motor de jaula de ardilla analizando los métodos de las normas IEC60034-2-1 y IEEE112. Sin embargo, es importante tener en cuenta la calibración de los instrumentos antes de realizar las pruebas con carga y al vacío; por tal motivo, es posible que los resultados tengan cierto margen de error, debido a que el laboratorio de la USTA así como ninguno en Colombia está certificado por la Red Nacional de Laboratorios, la ONAC y el SIC para estas pruebas de motores eléctricos. Cabe resaltar que las normas IEC60034-2-1 e IEEE112 exigen en general que los instrumentos de medición (temperatura, corriente, voltaje, potencia y resistencia) deben tener una clase de exactitud de $\pm 0.2\%$.

9. Anexos

9.1. Anexo A

IEEE112	METODO A	METODO B	METODO C	METODO B1	METODO D	METODO E O E1	METODO F O F1
Se puede aplicar a:	Máquinas no mayores a 1KW	*Las máquinas horizontales clasificadas en 1 – 300 kW. *Las máquinas verticales clasificadas en 1 – 300 kW. Si la construcción de los cojinetes lo permiten. *Las máquinas calificadas con un valor superior a 300 Kw	Las máquinas calificadas con un valor superior a 300 kW	Las máquinas calificadas con un valor superior a 300 kW	*Las máquinas verticales clasificadas en 1 – 300 kW. Si la construcción de los cojinetes lo permiten. *Las máquinas calificadas con un valor superior a 300 kW	*Las máquinas verticales clasificadas en 1 – 300 kW. Si la construcción de los cojinetes lo permiten. *Las máquinas calificadas con un valor superior a 300 kW	Las máquinas verticales clasificadas en 1 – 300 kW. Si la construcción de los cojinetes lo permiten.
01. Resistencia en frío	Si	Si	Si	Si	Si	No	No
02. Prueba de temperatura nominal de carga	Si	Si	No	No	No	No	No
03. Prueba con carga	Si	Corrección del dinamómetro	Si	No	Si	No	No
04. Prueba sin carga	No	Si	Si	Si	Si	Si	No
05. Esabilización de pérdidas de rodamiento	No	No	No	Si	No	No	No
06. Prueba de impedancia	No	No	No	No	No	Si	No
07. Pérdidas por fricción y viento	No	Si	Si	Si	Si	Si	No
08. Pérdidas del núcleo	No	Si	Si	Si	Si	Si	No
09. Pérdidas del estator	No	Si	Si	Si	Si	No	No
10. Pérdidas del rotor	No	Si	Si	Si	Si	No	No
11. Circuito equivalente	No	No	No	No	No	Si	No
12. Pérdidas totales aparentes	No	Si	Si	Si	No	No	No
13. Pérdidas residuales (Fórmula del método indirecto)	No	Si	Si	Si	Si	Si	No
14. Corrección de las pérdidas residuales	No	Si	Si	Si	No	No	No
15. Correcciones por temperatura de las pérdidas del estator	Si	No	No	No	No	No	No
16. Correcciones por temperatura de las pérdidas del rotor	No	Si	Si	Si	No	No	No
17. Corrección del total de pérdidas	No	Si	Si	Si	No	No	No
18. Corrección de la potencia mecánica	No	Si	Si	Si	No	No	No
19. Funcionamiento del motor/ generador	No	No	No	No	Si	No	No
20. Eficiencia	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
21. Factor de potencia	Si	Si	Si	Si	Si	No	No
22. Sumatoria de las características	No	Si	Si	Si	No	No	No
23. Cálculos del torque máximo	No	No	No	No	No	Si	No

Tabla 21: Resumen de las pruebas que solicita la norma IEEE112 y su aplicación dependiendo del método. Igualmente muestra los tipos de motores a los que se puede aplicar cada método según la misma norma técnica. Fuente: Autor

9.2. Anexo B

PASOS	IEEE112						
	METODO A	METODO B	METODO C	METODO B1	METODO D	METODO E OR E1	METODO F O F1
	Procedimientos de Prueba						
	Resistencia en frío						
1	Prueba de temperatura nominal de carga	Prueba sin carga	Prueba de temperatura nominal de carga	Pruebas sin carga de ambas máquinas	Prueba con carga	Prueba sin carga	
2	Prueba con carga		Prueba sin carga	Prueba con carga	Prueba sin carga	Prueba de impedancia	
3		Prueba sin carga		Prueba con carga		Prueba de carga parásita	Pérdidas por fricción y viento
4							Pérdidas del núcleo
5							Determinar el circuito equivalente
6							Prueba de carga parásita: Prueba del Método F Prueba del método F1
7	Cálculos (Formatos)						
8	Corrección de temperatura	Pérdidas por fricción y viento					
9	Eficiencia	Pérdidas del núcleo					
10		Pérdidas del estator					
11		Pérdidas del rotor					
12		Pérdidas totales aparentes	Pérdidas de carga parásita (Método indirecto)	Pérdidas totales aparentes	Pérdidas residuales	Pérdidas totales y potencia de salida	
13		Pérdidas residuales (Fórmula del método indirecto)			Suavizado de la pérdida residuales		
14		Suavizado de la pérdida residuales		Suavizado de la pérdida residuales			
15		Correcciones				Funcionamiento del motor/ generador	
16		Corrección de las pérdidas residuales				Ecuación de eficiencia de cada punto de prueba	
17		Corrección por temperatura de las pérdidas del estator				la eficacia, la corriente de línea y la velocidad se pueden trazar contra carga	Formato F2.9.13
18		Corrección de temperatura de las pérdidas del rotor				Los valores en los niveles de carga específicos se pueden incluir en el informe de rendimiento de la máquina	Cálculo de torque máximo
19		Corrección del total de pérdidas				Ecuación de factor de potencia	
20		Corrección de la potencia mecánica					
21		Eficiencia					
22		Factor de potencia %					
23		Sumatoria de las características					

Tabla 22: Resumen de los procedimientos aplicados en cada método de la norma IEEE112. Fuente: Autor

9.3. Anexo C

% carga	Voltaje	Amperios ENTRADA				Factor de Potencia Entrada				Velocidad rotor (rpm)	Velocidad rotor (rps)	Resistencia (KΩ)				Potencia IN Trifásica (W)	Potencia Out (W)	Temperatura (°C)	Torque (Nm)	Torque corregido al 2% por el Dinamometro (Nm)
		L1	L2	L3		L1	L2	L3				R_uw	R_vw	R_wu	R corregida					
0,00	206,00	0,77	0,77	0,79		0,21	0,20	0,20		1787,00	29,78	0,00	0,00	0,00	0,00	275,09	655,23	23,20	22,00	21,56
5,00	206,00	0,77	0,77	0,78		0,21	0,22	0,21		1787,00	29,78	1,30	1,69	2,16	1,30	275,09	595,67	23,20	20,00	19,60
10,00	206,00	0,77	0,77	0,79		0,21	0,22	0,20		1786,00	29,77	1,30	1,69	2,16	1,30	276,17	554,26	23,20	19,00	18,62
15,00	206,00	0,77	0,77	0,79		0,21	0,22	0,21		1786,00	29,77	1,60	2,08	2,64	1,59	275,45	551,34	22,30	18,90	18,52
20,00	206,00	0,77	0,77	0,79		0,22	0,23	0,22		1786,00	29,77	1,46	1,89	2,41	1,45	275,09	541,42	22,30	18,56	18,19
25,00	206,00	0,78	0,77	0,79		0,24	0,24	0,23		1784,00	29,73	1,60	2,07	2,62	1,59	276,88	519,83	22,30	17,84	17,48
30,00	206,00	0,78	0,78	0,80		0,27	0,28	0,27		1780,00	29,67	1,60	2,06	2,58	1,59	279,02	500,06	22,30	17,20	16,86
35,00	206,00	0,79	0,79	0,81		0,31	0,33	0,31		1776,00	29,60	1,60	2,02	2,50	1,59	283,30	475,73	22,20	16,40	16,07
40,00	206,00	0,81	0,82	0,83		0,37	0,39	0,37		1768,00	29,47	1,60	1,87	2,35	1,59	289,37	472,43	22,30	16,36	16,03
45,00	206,00	0,85	0,86	0,88		0,46	0,48	0,46		1754,00	29,23	1,60	1,87	2,13	1,59	301,85	458,38	22,30	16,00	15,68
50,00	206,00	0,90	0,92	0,94		0,56	0,58	0,54		1738,00	28,97	1,60	1,74	1,85	1,59	311,12	448,52	22,30	15,80	15,48
52,00	206,00	0,95	0,96	0,98		0,60	0,62	0,59		1728,00	28,80	1,60	1,66	1,70	1,59	337,18	440,29	22,30	15,60	15,29
55,00	206,00	0,98	1,01	1,03		0,65	0,66	0,64		1714,00	28,57	1,60	1,59	1,54	1,59	350,74	408,73	22,20	14,60	14,31
60,00	206,00	1,09	1,12	1,13		0,72	0,72	0,70		1690,00	28,17	1,70	1,52	1,35	1,69	388,91	366,57	22,30	13,28	13,01
62,00	206,00	1,18	1,21	1,23		0,76	0,77	0,75		1665,00	27,75	1,70	1,40	1,14	1,69	421,74	322,21	22,30	11,85	11,61
65,00	206,00	1,28	1,30	1,32		0,78	0,78	0,77		1652,00	27,53	1,70	1,30	0,99	1,69	455,64	263,35	22,30	9,76	9,56
68,00	206,00	1,42	1,46	1,46		0,80	0,81	0,79		1634,00	27,23	1,70	1,17	0,80	1,69	506,30	200,17	22,30	7,50	7,35
70,00	206,00	1,48	1,51	1,52		0,82	0,83	0,81		1613,00	26,88	1,70	1,12	0,74	1,69	526,64	178,36	22,30	6,77	6,63
72,00	206,00	1,59	1,63	1,63		0,83	0,84	0,82		1585,00	26,42	1,70	1,04	0,64	1,69	566,60	155,33	22,20	6,00	5,88
75,00	206,00	1,32	1,35	1,37		0,83	0,85	0,82		1561,79	26,03	1,70	1,26	0,92	1,69	470,57	138,26	22,30	5,42	5,31
80,00	206,00	1,39	1,43	1,44		0,90	0,91	0,89		1536,17	25,60	1,70	1,19	0,82	1,69	496,26	134,99	22,30	5,38	5,27
85,00	206,00	1,47	1,52	1,52		0,98	0,99	0,96		1508,06	25,13	1,70	1,12	0,74	1,69	524,54	80,03	23,00	3,25	3,18
90,00	206,00	1,56	1,61	1,61		1,05	1,06	1,03		1477,29	24,62	1,70	1,06	0,66	1,69	555,30	78,40	23,20	3,25	3,18
95,00	206,00	1,65	1,70	1,71		1,12	1,13	1,11		1444,07	24,07	1,70	1,00	0,58	1,69	587,76	25,47	23,20	1,08	1,06
100,00	206,00	1,74	1,80	1,80		1,19	1,20	1,18		1408,61	23,48	13,48	7,48	4,15	13,43	621,04	24,85	23,20	1,08	1,06

Tabla 23: IE IEEE112 - Método B. Datos tomados durante la prueba con carga en el laboratorio de la USTA del sistema del motor de jaula de ardilla (Festo, (8221-00)) . Fuente: Autor

9.4. Anexo D

Torque corregido al 2% por el Dinamometro(Nm)	Pérdidas aparentes	Pérdidas del estator	Pérdidas de viento y fricción	Pérdidas en el núcleo	Pérdidas del rotor	Pérdidas por carga parásita Corregidas	Pérdidas por carga parásita	Pérdidas por carga parásita asumidos	Pérdidas totales	Potencia OUT con pérdidas asumidas (W)	Eficiencia por pérdidas (%)	Eficiencia por pérdidas residuales asumidas (%)
21.56	380.14	0.00	0.80	0.80	2.78	0.00	-100.66	4.13	-96.28	371.38	96.68	96.68
19.60	320.57	1.15	0.80	1.95	5.07	0.00	-36.49	4.13	-27.51	302.61	96.68	95.23
18.62	278.09	1.16	0.80	1.96	5.25	1.70	7.25	4.14	9.18	266.99	96.68	95.18
18.52	275.89	1.42	0.80	2.22	5.76	1.68	9.78	4.13	10.21	265.24	96.29	94.79
18.19	266.33	1.30	0.80	2.10	5.51	1.62	18.47	4.13	9.70	265.39	96.47	94.97
17.48	242.96	1.44	0.80	2.24	6.11	1.50	44.51	4.15	10.59	266.29	96.18	94.68
16.86	221.04	1.46	0.80	2.26	6.78	1.39	69.28	4.19	11.31	267.71	95.95	94.45
16.07	192.43	1.51	0.80	2.31	7.54	1.27	103.03	4.25	12.15	271.15	95.71	94.21
16.03	183.07	1.57	0.80	2.37	9.02	1.26	120.06	4.34	13.76	275.60	95.24	93.74
15.68	156.52	1.71	0.80	2.51	11.83	1.21	162.18	4.53	16.85	285.00	94.42	92.92
15.48	127.40	1.94	0.80	2.74	15.57	1.18	214.77	4.82	21.05	300.08	93.45	91.95
15.29	103.12	2.14	0.80	2.93	18.35	1.15	258.29	5.06	24.22	312.95	92.82	91.32
14.31	58.00	2.31	0.80	3.11	21.92	1.00	320.88	5.26	28.14	322.60	91.98	90.48
13.01	22.34	3.02	0.80	3.82	30.19	0.83	404.39	5.83	37.82	351.09	90.28	88.78
11.61	99.53	3.55	0.80	4.35	38.94	0.66	369.84	6.33	47.63	374.11	88.71	87.21
9.56	192.29	4.14	0.80	4.94	45.80	0.45	319.04	6.83	55.69	399.95	87.78	86.28
7.35	306.14	5.12	0.80	5.91	56.71	0.26	268.70	7.59	68.54	437.77	86.46	84.96
6.63	348.28	5.53	0.80	6.33	65.35	0.22	256.38	7.90	78.02	448.62	85.19	83.69
5.88	411.27	6.41	0.80	7.21	79.66	0.17	249.41	8.50	94.08	472.53	83.40	81.90
5.31	332.31	4.42	0.80	5.22	70.64	0.14	219.33	7.06	81.07	389.49	82.77	81.27
5.27	361.27	4.91	0.80	5.71	81.81	0.14	228.22	7.44	93.24	403.02	81.21	79.71
3.18	444.52	5.49	0.80	6.29	94.95	0.05	187.55	7.87	107.53	417.02	79.50	78.00
3.18	476.91	6.15	0.80	6.95	110.31	0.05	202.61	8.33	124.22	431.09	77.63	76.13
1.06	562.29	6.89	0.80	7.69	127.93	0.01	168.79	8.82	143.31	444.45	75.62	74.12
1.06	596.19	61.03	0.80	61.83	231.18	0.00	379.68	9.32	354.83	266.20	42.86	41.36

Tabla 24: IE IEEE112 - Método B Cálculos de potencias, pérdidas y correcciones en la prueba con carga en el laboratorio de la USTA del sistema del motor de jaula de ardilla (Festo, (8221-00)). Fuente: Autor

9.5. Anexo E

% VOLTAE IN	FRECUENCIA (Hz)	VOLT(ph-ph)			Amperios			Factor de potencia			Resistencia (K Ω)			RPM	RPS	Torque (Nm)	Temperatura ($^{\circ}$ C)	Potencia de entrada (kw)	KW OUT =Torque * Vel. Angular
		I1	L2	L3	I1	L2	L3	I1	L2	L3	R _{uw}	R _{vw}	R _{wu}						
10.00	60.04	24.4	23.8	23.2	0.108	0.11	0.117	0.3	0.4	0.00	1.3	1.6	1.6	1705.00	28.42	3.25	23.2	1.34	92.35
15.00	60.08	34.6	33.6	33.6	0.121	0.129	0.145	0.35	0.42	0.00	1.6	1.6	1.6	1775.00	29.58	3.25	22.7	2.46	96.15
20.00	60.01	45.00	44.00	44.00	0.155	0.183	0.141	0.44	0.29	0.24	1.46	1.2	1.6	1787.00	29.78	3.25	22.9	5.20	96.80
25.00	60.05	58.2	57.5	57.5	0.216	0.191	0.19	0.24	0.32	0.00	1.6	1.6	1.6	1788.00	29.80	3.25	22.5	5.10	96.85
30.00	60.05	69.7	69.00	68.5	0.226	0.236	0.242	0.2	0.22	0.1	1.6	1.7	1.7	1789.00	29.82	3.25	22.00	5.40	96.90
35.00	60.03	78.9	78.00	78.1	0.268	0.278	0.252	0.15	0.24	0.09	1.6	1.7	1.7	1790.00	29.83	3.25	22.4	5.43	96.96
40.00	60.01	88.6	87.5	87.6	0.29	0.3	0.28	0.12	0.26	0.14	1.6	1.6	1.6	1794.00	29.90	3.25	22.5	5.27	97.18
45.00	60.08	98.6	98.4	98.5	0.32	0.32	0.3	0.12	0.24	0.12	1.6	1.6	1.6	1794.00	29.90	3.25	22.7	6.54	97.18
50.00	60.04	103.8	103.4	103.2	0.35	0.36	0.33	0.13	0.23	0.1	1.6	1.6	1.6	1795.00	29.92	3.25	22.5	8.15	97.23
55.00	60.04	111.6	111.2	111.2	0.38	0.39	0.4	0.13	0.2	0.1	1.6	1.6	1.6	1796.00	29.93	3.25	22.4	9.51	97.28
60.00	60.05	120.8	119.7	119.3	0.41	0.422	0.42	0.12	0.18	0.1	1.7	1.7	1.7	1797.00	29.95	3.25	22.4	10.20	97.34
65.00	60.01	130.6	130.5	130.3	0.44	0.44	0.45	0.12	0.18	0.1	1.7	1.6	1.61	1798.00	29.97	3.25	22.5	11.93	97.39
70.00	60.03	140.6	139.9	139.9	0.486	0.495	0.472	0.12	0.17	0.1	1.7	1.7	1.71	1797.00	29.95	3.25	22.7	14.13	97.34
75.00	60.05	149.8	149.7	149.1	0.49	0.48	0.49	0.11	0.17	0.1	1.7	1.6	1.6	1799.00	29.98	3.25	22.5	12.71	97.45
80.00	60.03	159.9	159.1	158.4	0.56	0.55	0.54	0.09	0.17	0.1	1.7	1.7	1.5	1800.00	30.00	3.25	22.7	13.89	97.50
85.00	60.04	170.1	170.00	170.00	0.6	0.59	0.6	0.1	0.16	0.1	1.7	1.7	1.7	1000.00	16.67	3.25	22.4	17.67	54.17
90.00	60.2	181.5	180.07	180.3	0.652	0.66	0.63	0.1	0.16	0.00	1.7	1.74	1.82	1799.00	29.98	3.25	22.3	20.34	97.45
100.00	60.00	206.00	206.00	205.7	0.77	0.76	0.748	0.11	0.09	0.16	13.48	11.27	11.56	1798.00	29.97	3.25	22.00	30.22	97.39

Tabla 25: Datos tomados durante la prueba sin carga o al vacío, del sistema del motor de jaula de ardilla (Festo, (8221-00)). Fuente: Autor

9.6. Anexo F

Potencia de entrada (W)	KW OUT =Torque * Vel. Angular	Pérdidas aparentes	Pérdidas del Estator	Pérdidas por viento y fricción	Pérdidas en el núcleo	Pérdidas en el rotor	Pérdidas por carga parásita	Pérdidas totales	Eficiencia (%)
13,80	92,35	13,80	0,02	2,98	10,80	13,64	27,44	54,89	100,00
23,20	96,15	23,20	0,04	2,98	20,18	23,16	46,35	92,71	100,00
36,77	96,80	36,77	0,05	2,98	33,74	36,75	73,53	147,05	100,00
59,72	96,85	59,72	0,11	2,98	56,63	59,70	119,42	238,84	100,00
84,20	96,90	84,20	0,12	2,98	81,10	84,18	168,38	336,77	100,00
108,27	96,96	108,27	0,17	2,98	105,12	108,25	216,53	433,05	100,00
132,45	97,18	132,45	0,20	2,98	129,27	132,44	264,90	529,79	100,00
160,37	97,18	160,37	0,25	2,98	157,14	160,36	320,73	641,47	100,00
186,39	97,23	186,38	0,29	2,98	183,11	186,38	372,77	745,53	100,00
225,61	97,28	225,61	0,35	2,98	222,28	225,60	451,22	902,43	100,00
260,06	97,34	260,06	0,43	2,98	256,65	260,06	520,12	1040,25	100,00
300,54	97,39	300,54	0,49	2,98	297,07	300,54	601,09	1202,17	100,00
352,67	97,34	352,67	0,60	2,98	349,09	352,67	705,34	1410,68	100,00
378,14	97,45	378,13	0,61	2,98	374,54	378,13	756,28	1512,55	100,00
454,81	97,50	454,81	0,80	2,98	451,03	454,81	909,63	1819,25	100,00
527,17	54,17	527,16	0,92	2,98	523,27	525,84	1053,02	2106,03	100,00
607,56	97,45	607,55	1,08	2,98	603,49	607,56	1215,12	2430,23	100,00
812,41	97,39	812,40	11,99	2,98	797,44	812,40	1624,82	3249,63	100,00

Tabla 26: Cálculos de potencias, pérdidas y correcciones de los datos obtenidos del motor de jaula de ardilla Lab Volt 8221-00 durante la prueba al vacío. Fuente: Autor

9.7. Anexo G

carga circuito 1	Voltaje nominal (V)		Voltaje ph-N (V)				Voltaje ph-ph (V)				coseno 1		Amperios ENTRADA			Coseno2		Potencia (kW)		
	R_uv	R_vw	L1	L2	L3		L1	L2	L3				L1	L2	L3			L1	L2	L3
1000	21,86	206,00	10,40	32,30	20,50		26,00	27,20	0,00		0,70	0,70	0,39	1,24	0,86		0,70	0,01	0,07	0,03
1500	12,36	206,00	15,60	19,30	12,30		46,20	52,40	0,00		0,60	0,60	0,41	0,98	0,58		0,60	0,00	0,02	0,00
1600	12,34	206,00	15,60	19,30	12,30		54,70	62,80	0,00		0,60	0,60	0,51	1,23	0,73		0,60	0,00	0,03	0,01
2100	70,62	206,00	20,36	10,90	12,30		55,80	54,20	0,00		0,70	0,70	0,51	1,28	0,70		0,70	0,00	0,02	0,01
2100	16,73	206,00	15,66	77,10	28,00		57,70	66,50	0,00		0,60	0,60	0,54	1,33	0,79		0,60	0,00	0,04	0,01
1700	30,77	206,00	66,30	40,60	26,10		57,70	68,20	0,00		0,60	0,60	0,64	1,59	0,96		0,60	0,01	0,05	0,02
1800	20,28	206,00	18,60	43,50	27,10		60,10	69,50	0,00		0,60	0,60	0,39	1,24	0,86		0,70	-0,01	0,02	0,01
1900	18,55	206,00	21,00	43,00	28,00		60,10	69,50	0,00		0,60	0,60	0,38	1,41	0,85		0,60	0,00	0,04	0,01
2100	18,41	212,00	20,20	48,70	32,40		70,10	81,80	15,00		0,60	0,60	0,69	1,71	1,04		0,60	0,01	0,06	0,02
2300	18,03	222,00	22,10	50,00	32,00		70,30	81,90	14,90		0,60	0,60	0,69	1,71	1,04		0,60	0,01	0,06	0,02
2500	19,55	222,00	22,00	54,10	35,20		76,40	89,50			0,70	0,70	0,76	1,91	1,17		0,70	0,00	0,08	0,02
2900	21,86	222,00	23,70	55,80	35,00		79,90	93,90	17,50		0,70	0,70	0,78	2,01	1,23		0,70	0,01	0,08	0,03
3000	12,34	222,00	26,40	56,50	40,00		85,60	100,90	18,80		0,70	0,70	0,87	2,19	1,35		0,70	0,01	0,10	0,04
2200	12,36	222,00	49,50	62,10	41,10		87,20	103,10	19,40		0,70	0,70	0,88	2,24	1,37		0,70	0,01	0,10	0,04
3000	27,00	222,00	26,50	59,00	30,60		91,70	89,40	15,80		0,50	0,77	0,77	1,08	0,75		0,50	-0,01	0,04	0,02
2400	24,00	222,00	35,20	71,10	37,20		93,60	104,50	16,10		0,50	0,99	0,99	1,37	0,95		0,50	-0,02	0,06	0,04
2400	122,00	222,00	42,00	67,00	45,00		95,00	112,00	21,00		0,70	0,99	0,99	2,47	1,50		0,70	0,02	0,12	0,04
3500	122,00	222,00	28,00	78,50	41,30		122,20	119,40	24,40		0,50	1,03	1,03	1,68	1,19		0,60	0,01	0,10	0,04
2400	24,00	222,00	46,10	106,40	71,90		135,90	163,90	32,40		0,70	1,62	1,62	4,19	2,62		0,70	0,05	0,36	0,14
5000	122,00	222,00	42,40	89,40	47,50		138,10	135,60	28,30		0,60	1,33	1,33	1,82	1,26		0,60	-0,03	0,11	0,06
3000	122,00	222,00	52,10	95,80	53,00		167,10	165,10	36,30		0,60	1,71	1,71	2,33	1,61		0,60	-0,04	0,17	0,09
4000	122,00	222,00	58,00	100,00	59,00		179,40	178,10	37,70		0,80	2,05	2,05	2,78	1,91		0,80	-0,05	0,19	0,10
4500	122,00	222,00	64,00	120,70	81,40		47,80	120,70	81,40		0,80	1,83	1,83	4,77	2,99		0,80	0,06	0,46	0,19

Resistencia (KΩ)	Frecuencia (Hz)		Velocidad del rotor (rpm)	Velocidad del rotor (rps)	Torque (Nm)	Potencia IN total (W)	Potencia IN Trifásica (W)			Potencia OUT (W)
	R_uv	R_vw					L1	L2	L3	
15,24	8,22	7,15	1205,50	20,09	1900	359,63	56,81	178,23	124,59	381,74
21,86	19,03	20,58	1223,90	20,40	1890	243,12	50,92	121,13	71,07	385,53
12,36	9,04	9,67	1223,00	20,38	1856	306,03	62,91	152,40	90,72	378,31
12,34	8,71	10,14	1225,00	20,42	1762	359,06	73,54	184,58	100,94	359,74
70,62	33,60	20,36	1250,30	20,84	1720	328,90	66,99	163,77	98,14	358,42
16,73	14,76	15,66	1251,00	20,85	1800,00	394,53	79,35	196,28	118,90	341,94
30,77	20,32	18,11	1253,40	20,89	1636	359,63	56,81	178,23	124,59	341,76
20,28	17,59	19,04	1250,00	20,83	1600	207,52	42,09	103,29	62,15	333,33
18,55	16,79	18,04	1258,00	20,97	1580	251,37	50,36	125,10	75,91	331,27
18,41	16,87	17,85	1260,50	21,01	1800,00	251,52	50,51	125,25	75,76	327,73
18,03	16,38	17,44	1260,61	21,01	1460	327,17	64,82	162,86	99,49	306,75
19,55	16,04	16,44	1260,00	21,00	1328	343,03	66,59	171,48	104,96	278,88
32,92	14,87	17,14	1261,69	21,03	1185	376,53	74,13	187,37	115,03	249,14
17,33	16,04	17,28	1266,00	21,10	976	383,53	75,41	190,87	117,25	205,94
26,43	31,54	23,68	1266,70	21,11	750	158,30	46,91	65,88	45,51	158,34
24,47	29,96	22,61	1267,08	21,12	677	201,97	60,45	83,57	57,95	142,97
16,33	15,66	17,29	1274,60	21,24	600	423,84	84,55	210,94	128,36	127,46
25,92	27,01	20,12	1280,00	21,33	542	284,75	75,18	122,83	86,74	115,63
15,11	14,66	15,85	1310,43	21,84	538	719,92	138,35	357,91	223,66	117,50
22,55	28,34	21,70	1305,57	21,76	325	323,47	97,65	133,30	92,52	70,70
19,55	23,77	19,05	1290,64	21,51	325	413,29	125,39	170,34	117,56	69,89
18,02	20,77	17,86	1316,64	21,94	1,08	493,22	150,13	203,50	139,59	23,70
15,06	14,60	15,70	1344,70	22,41	1,08	936,86	178,80	465,94	292,12	24,20

Tabla 27: Norma IE IEC60034-2-1, Método Eh-star. Datos tomados durante la prueba con carga en el laboratorio de la USTA del sistema del motor de jaula de ardilla (Festo, (8221-00)). Fuente: Autor

9.8. Anexo H

Pérdidas aparentes L1				Total de pérdidas aparentes			Pérdidas del estator L1			Pérdidas de viento y fricción L1			Pérdidas del núcleo L1			Pérdidas del rotor L1		
L1	L2	L3		L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
324,93	203,51	257,15		785,59	3,55	18,84	8,01	5,33	4,20	-2,90	47,93	119,49	1,76	204,53	-55,15			
334,61	264,40	314,46		913,46	5,57	27,41	10,21	5,33	4,20	-2,90	40,02	155,19	1,76	207,85	-54,86			
315,40	225,92	287,59		828,91	4,80	20,61	7,82	5,33	4,20	-2,90	52,77	127,59	1,71	207,54	-53,87			
286,20	175,17	258,80		720,17	4,81	21,39	7,46	5,33	4,20	-2,90	63,39	158,98	1,70	227,81	-51,15			
291,43	194,65	260,28		746,36	31,12	88,47	19,25	5,33	4,20	-2,90	30,54	71,10	1,63	207,48	-49,93			
262,59	145,66	223,04		631,29	10,34	55,84	21,74	5,33	4,20	-2,90	63,68	136,24	1,63	206,93	-47,60			
284,95	163,53	217,17		665,65	7,17	46,56	20,28	5,33	4,20	-2,90	44,32	127,47	1,62	204,53	-47,49			
291,24	230,05	271,19		792,48	10,06	52,54	20,59	5,33	4,20	-2,90	26,70	46,54	1,63	207,20	-46,44			
280,91	206,17	255,36		742,45	13,17	73,56	29,10	5,33	4,20	-2,90	31,86	47,34	1,61	207,15	-45,86			
277,22	202,48	251,97		731,67	13,15	74,09	28,68	5,33	4,20	-2,90	32,03	46,95	1,60	207,52	-45,28			
241,93	143,89	207,26		593,08	15,58	89,35	35,51	5,33	4,20	-2,90	43,91	66,88	1,60	207,29	-42,38			
212,29	107,40	173,92		493,61	17,83	97,04	37,25	5,33	4,20	-2,90	43,43	70,25	1,60	207,96	-38,55			
175,01	61,77	134,11		370,90	37,21	107,35	46,66	5,33	4,20	-2,90	31,58	75,81	1,60	207,09	-34,39			
130,53	15,07	88,68		234,28	20,26	120,20	48,87	5,33	4,20	-2,90	49,81	66,47	1,58	207,14	-28,33			
111,43	92,46	112,83		316,72	23,44	55,18	19,77	5,33	4,20	-2,90	18,13	6,50	28,64	1,58	104,44	-21,77		
82,52	59,40	85,02		226,94	36,05	84,36	30,61	5,33	4,20	-2,90	19,07	-4,99	30,25	1,58	101,40	-19,65		
42,91	83,48	0,90		127,29	24,01	143,32	58,57	5,33	4,20	-2,90	55,21	63,42	1,56	207,17	-17,43			
40,45	7,20	28,88		76,54	41,00	114,08	43,38	5,33	4,20	-2,90	28,84	4,55	47,68	1,54	133,57	-15,73		
20,85	200,41	105,16		397,42	59,49	386,19	162,08	5,33	4,20	-2,90	72,53	-32,47	63,49	1,46	206,50	-15,62		
26,95	62,60	21,83		111,38	60,19	140,99	52,00	5,33	4,20	-2,90	32,13	-11,89	43,43	1,47	99,27	-9,43		
55,50	100,45	47,67		203,62	86,04	193,06	73,71	5,33	4,20	-2,90	34,02	-26,93	46,75	1,51	99,35	-9,43		
126,43	179,80	115,89		422,12	113,68	240,76	97,44	5,33	4,20	-2,90	31,12	-41,46	45,06	1,43	99,90	-3,13		
154,60	441,74	267,91		864,25	75,84	499,02	210,99	5,33	4,20	-2,90	97,63	-37,28	84,03	1,35	206,74	-3,13		

Pérdidas por carga parásita R _{eh}	Pérdidas totales L1			Potencia con Pérdidas L1			Potencia con pérdidas total	Eficiencia (%)
	L1	L2	L3	L1	L2	L3		
-0,01	58,56	765,51	69,42	301,07	-405,87	290,21	185,41	106,15
-0,01	52,62	657,94	16,20	190,50	-414,81	226,93	2,62	158,57
-0,12	64,50	719,76	36,73	241,53	-413,73	269,31	97,11	123,62
-0,12	75,12	824,65	49,67	283,94	-465,59	309,38	127,73	100,19
-0,34	68,28	742,17	47,88	260,62	-413,27	281,02	128,37	108,98
-0,34	80,64	806,08	70,96	313,89	-411,55	323,57	225,91	86,67
-0,53	57,91	765,00	76,58	301,73	-405,36	283,06	179,42	95,03
-0,53	43,19	620,44	15,18	164,33	-412,92	192,34	-56,25	160,63
-1,09	50,88	663,41	28,96	200,49	-412,05	222,41	10,86	131,79
-1,09	51,02	664,44	29,39	200,50	-412,93	222,12	9,69	130,30
-2,02	64,40	738,28	55,09	262,77	-411,11	272,07	123,73	93,76
-2,02	66,18	760,88	64,39	276,86	-417,84	278,64	137,66	81,30
-3,05	72,68	785,87	77,60	303,85	-409,34	298,93	193,44	66,17
-3,80	73,18	792,22	85,12	310,35	-408,69	298,41	200,07	53,69
-4,11	44,38	336,53	19,63	113,91	-178,23	138,67	74,35	100,03
-4,06	57,97	365,87	34,24	144,00	-163,90	167,73	147,82	70,79
-4,01	82,10	832,21	106,93	341,74	-408,37	316,91	250,28	30,07
-4,01	72,71	488,79	67,00	212,03	-204,04	217,75	225,74	40,61
-3,56	136,24	1125,27	204,49	583,68	-405,35	515,43	693,77	16,32
-3,32	95,80	461,81	79,77	227,67	-138,34	243,70	333,03	21,86
-3,05	123,86	536,33	105,08	289,43	-123,04	308,20	474,59	16,91
-2,03	149,54	604,76	134,43	343,68	-111,54	358,79	590,93	4,81
-1,33	178,82	1344,03	287,65	758,05	-407,17	649,21	1000,09	2,58

Tabla 28: Norma IEC60034-2-1 Pérdidas residuales a partir del ensayo con resistencia Eh-Star. Fuente: Autor

9.9. Anexo I

PLL a partir de las pérdidas asignadas Corregido	Pérdidas totales L1			Potencia con Pérdidas L1			Potencia con pérdidas total	Eficiencia con pérdidas asignadas(%)
	L1	L2	L3	L1	L2	L3		
-5,01E-07	58,56	765,51	69,42	301,07	-405,87	290,21	185,41	51,56
-5,01E-07	52,62	657,94	16,20	190,50	-414,81	226,93	2,62	1,08
-4,51E-06	64,50	719,76	36,73	241,53	-413,73	269,31	97,11	31,73
-4,51E-06	75,12	824,65	49,67	283,94	-465,59	309,38	127,73	35,57
-1,25E-05	68,28	742,17	47,88	260,62	-413,27	281,02	128,37	39,03
-1,25E-05	80,64	806,08	70,96	313,89	-411,55	323,57	225,91	57,26
-1,96E-05	57,91	765,00	76,58	301,73	-405,36	283,06	179,42	49,89
-1,96E-05	43,19	620,44	15,18	164,33	-412,92	192,34	-56,25	-27,11
-4,05E-05	50,88	663,41	28,96	200,49	-412,05	222,41	10,86	4,32
-4,05E-05	51,02	664,44	29,39	200,50	-412,93	222,12	9,69	3,85
-7,51E-05	64,40	738,28	55,09	262,77	-411,11	272,07	123,73	37,82
-7,51E-05	66,18	760,88	64,39	276,86	-417,84	278,64	137,66	40,13
-1,13E-04	72,68	785,87	77,60	303,85	-409,34	298,93	193,44	51,38
-1,42E-04	73,18	792,22	85,12	310,35	-408,69	298,41	200,07	52,17
-1,53E-04	44,38	336,53	19,63	113,91	-178,23	138,67	74,35	46,97
-1,51E-04	57,97	365,87	34,24	144,00	-163,90	167,73	147,82	73,19
-1,49E-04	82,10	832,21	106,93	341,74	-408,37	316,91	250,28	59,05
-1,49E-04	72,71	488,79	67,00	212,03	-204,04	217,75	225,74	79,28
-1,32E-04	136,24	1125,27	204,49	583,68	-405,35	515,43	693,77	96,37
-1,24E-04	95,80	461,81	79,77	227,67	-138,34	243,70	333,03	102,95
-1,13E-04	123,86	536,33	105,08	289,43	-123,04	308,20	474,59	114,83
-7,55E-05	149,54	604,76	134,43	343,68	-111,54	358,79	590,93	119,81
0,00E+00	178,82	1344,03	287,65	758,05	-407,17	649,21	1000,09	106,75

Tabla 29: Norma IEC60034-2-1 Pérdidas residuales a partir de las pérdidas asignadas. Fuente: Autor.

9.10. Anexo J

THD_vf	THD_vA5	THD_vA3	THD>If	THD_IA5	THD_IA3	TORQUE (Nm)
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	30,0000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	28,0000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	26,0000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	24,0000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	22,0000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	20,0000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	19,0000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	18,9000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	18,5600000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	17,6200000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	17,2000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	16,4000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	16,0000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	15,8000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	15,6000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	14,6000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	13,2800000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	11,8500000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	9,7600000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	7,5000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	6,7700000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	6,0000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	5,4200000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	5,3800000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	3,2500000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	3,2500000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	1,0800000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	1,0800000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	1,0000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000000000
0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	0,0000000149012	20,0000000000000

Tabla 30: Valores de tasa de distorsión armónica calculado en la simulación del sistema trifásico cuya fuente tiene una distorsión armónica de quinto y séptimo orden. Fuente: Autor

9.11. Anexo K

Torque Nm	Ef. Aparente (%)	Ef. Activa (%)	Ef. Reactiva (%)	Ef. Instantanea (%)	Potencia Aparente (W)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (W)	Potencia Instantanea (W)	Potencia Out (w)
30,0	97,1	18,7	65535,0	50,2	144,1	748,8	0,0	279,0	139,9
28,0	110,0	21,2	65535,0	56,8	144,1	748,7	0,0	279,0	158,4
26,0	120,0	23,1	65535,0	62,0	144,1	748,6	0,0	279,0	172,9
24,0	127,3	24,5	65535,0	65,7	144,1	748,5	0,0	279,1	183,4
22,0	131,9	25,4	65535,0	68,1	144,0	748,4	0,0	279,1	190,0

24,0	127,3	24,5	65535,0	65,7	144,1	748,5	0,0	279,1	183,4
22,0	131,9	25,4	65535,0	68,1	144,0	748,4	0,0	279,1	190,0
20,0	133,7	25,7	65535,0	69,0	144,0	748,4	0,0	279,2	192,6
19,0	133,6	25,7	65535,0	68,9	144,0	748,4	0,0	279,2	192,4
18,9	133,5	25,7	65535,0	68,9	144,0	748,4	0,0	279,2	192,3
18,6	133,3	25,7	65535,0	68,8	144,0	748,4	0,0	279,2	192,0
17,6	132,2	25,4	65535,0	68,2	144,0	748,4	0,0	279,2	190,5
17,2	131,6	25,3	65535,0	67,9	144,0	748,4	0,0	279,2	189,5
16,4	130,0	25,0	65535,0	67,0	144,0	748,4	0,0	279,3	187,2
16,4	129,9	25,0	65535,0	67,0	144,0	748,4	0,0	279,3	187,1
16,0	129,0	24,8	65535,0	66,5	144,0	748,4	0,0	279,3	185,8
15,8	128,5	24,7	65535,0	66,3	144,0	748,4	0,0	279,3	185,1
15,6	127,9	24,6	65535,0	66,0	144,0	748,4	0,0	279,3	184,3
14,6	124,8	24,0	65535,0	64,3	144,0	748,4	0,0	279,3	179,7
13,3	119,5	23,0	65535,0	61,6	144,0	748,4	0,0	279,4	172,1
11,9	112,5	21,6	65535,0	58,0	144,0	748,5	0,0	279,4	162,0
9,8	99,7	19,2	65535,0	51,4	144,1	748,6	0,0	279,5	143,6
7,5	82,4	15,9	65535,0	42,5	144,1	748,7	0,0	279,6	118,7
6,8	76,1	14,6	65535,0	39,2	144,1	748,7	0,0	279,6	109,6
6,0	69,0	13,3	65535,0	35,6	144,1	748,8	0,0	279,7	99,5
5,4	63,4	12,2	65535,0	32,7	144,1	748,8	0,0	279,7	91,4
5,4	63,4	12,2	65535,0	32,7	144,1	748,8	0,0	279,7	91,4
3,3	40,4	7,8	65535,0	20,8	144,1	749,0	0,0	279,8	58,3
3,3	40,4	7,8	65535,0	20,8	144,1	749,0	0,0	279,8	58,3
1,1	14,2	2,7	65535,0	7,3	144,2	749,2	0,0	279,9	20,5
1,0	13,2	2,5	65535,0	6,8	144,2	749,2	0,0	279,9	19,1

Tabla 31: Potencias de entrada al motor (Festo, (8221-00)) calculado en la simulación del sistema trifásico cuya fuente es balanceada. Fuente: Autor

9.12. Anexo L

Torque (Nm)	Ef. Aparente (%)	Ef. Activa (%)	Ef. Reactiva (%)	Ef. Instantanea (%)	Potencia Aparente (W)	Potencia Activa (W)	Potencia Reactiva (W)	Potencia Instantanea (W)	Potencia Out (w)
30,00	94,99	18,28	65535,00	48,24	147,35	765,64	0,00	290,15	139,97
28,00	107,54	20,70	65535,00	54,60	147,32	765,50	0,00	290,16	158,43
26,00	117,39	22,59	65535,00	59,59	147,30	765,39	0,00	290,19	172,92
24,00	124,54	23,97	65535,00	63,21	147,28	765,30	0,00	290,22	183,43
22,00	129,00	24,83	65535,00	65,45	147,27	765,24	0,00	290,26	189,98
20,00	130,76	25,16	65535,00	66,33	147,26	765,20	0,00	290,31	192,56
19,00	130,63	25,14	65535,00	66,25	147,26	765,19	0,00	290,34	192,36
18,90	130,57	25,13	65535,00	66,23	147,26	765,19	0,00	290,34	192,29
18,56	130,35	25,09	65535,00	66,11	147,26	765,19	0,00	290,35	191,96
17,62	129,33	24,89	65535,00	65,59	147,26	765,19	0,00	290,38	190,46
17,20	128,68	24,77	65535,00	65,26	147,26	765,19	0,00	290,39	189,50
16,40	127,12	24,46	65535,00	64,46	147,26	765,20	0,00	290,42	187,20
16,00	126,17	24,28	65535,00	63,98	147,26	765,20	0,00	290,43	185,81
15,80	125,66	24,18	65535,00	63,72	147,26	765,21	0,00	290,44	185,05
15,60	125,12	24,08	65535,00	63,44	147,26	765,21	0,00	290,45	184,26
14,60	122,02	23,48	65535,00	61,86	147,27	765,23	0,00	290,48	179,69
13,28	116,89	22,50	65535,00	59,25	147,27	765,26	0,00	290,53	172,15
11,85	110,00	21,17	65535,00	55,76	147,28	765,31	0,00	290,59	162,02
9,76	97,46	18,76	65535,00	49,39	147,30	765,41	0,00	290,68	143,57
7,50	80,59	15,51	65535,00	40,83	147,33	765,54	0,00	290,78	118,73

6,77	74,41	14,32	65535,00	37,70	147,34	765,59	0,00	290,82	109,63
6,00	67,50	12,99	65535,00	34,19	147,35	765,64	0,00	290,86	99,45
5,42	62,03	11,94	65535,00	31,42	147,36	765,69	0,00	290,88	91,40
5,38	61,64	11,86	65535,00	31,23	147,36	765,69	0,00	290,89	90,83
3,25	39,56	7,61	65535,00	20,04	147,39	765,87	0,00	291,00	58,31
3,25	39,56	7,61	65535,00	20,04	147,39	765,87	0,00	291,00	58,31
1,08	13,93	2,68	65535,00	7,06	147,43	766,07	0,00	291,11	20,54
1,08	13,93	2,68	65535,00	7,06	147,43	766,07	0,00	291,11	20,54
1,00	12,93	2,49	65535,00	6,55	147,43	766,08	0,00	291,11	19,06
0,00	0,00	0,00	65535,00	0,00	147,45	766,18	0,00	291,17	0,00
20,00	130,76	25,16	65535,00	66,33	147,26	765,20	0,00	290,31	192,56

Tabla 32: Resultado de la simulación IEEE1459 de las potencias de entrada de motor de jaula de ardilla. Fuente: Autor

9.13. Anexo M

% carga	Voltaje	corriente Entrada (A)			Potencia Entrada con carga			Velocidad del rotor (rpm)	Resistencia del estator (Ω)	Potencia Out (W) = Torque * Vel. Angular	Torque (Nm)	Potencia IN Trifasica (W)
	L1	L1	L2	L3	L1	L2	L3					
0,00	206,00	0,77	0,77	0,79	0,02	0,02	0,02	1787,00	8,00	189,98	22,00	169,84
5,00	206,00	0,77	0,77	0,78	0,02	0,02	0,02	1787,00	8,00	192,56	20,00	169,87
10,00	206,00	0,77	0,77	0,79	0,02	0,02	0,02	1786,00	8,00	192,36	19,00	169,89
15,00	206,00	0,77	0,77	0,79	0,02	0,02	0,02	1786,00	8,00	192,29	18,90	169,89
20,00	206,00	0,77	0,77	0,79	0,02	0,02	0,02	1786,00	8,00	191,96	18,56	169,90
25,00	206,00	0,78	0,77	0,79	0,02	0,02	0,02	1784,00	8,00	190,46	17,62	169,91
30,00	206,00	0,78	0,78	0,80	0,03	0,03	0,03	1780,00	8,00	189,50	17,20	169,92
35,00	206,00	0,79	0,79	0,81	0,03	0,03	0,03	1776,00	8,00	187,20	16,40	169,94
40,00	206,00	0,81	0,82	0,83	0,04	0,04	0,04	1768,00	8,00	185,81	16,36	169,94
45,00	206,00	0,85	0,86	0,88	0,05	0,05	0,05	1754,00	8,00	185,05	16,00	169,95
50,00	206,00	0,90	0,92	0,94	0,06	0,07	0,07	1738,00	8,00	184,26	15,80	169,95
52,00	206,00	0,95	0,96	0,98	0,07	0,07	0,07	1728,00	8,00	179,69	15,60	169,97
55,00	206,00	0,98	1,01	1,03	0,08	0,09	0,08	1714,00	8,00	172,15	14,60	170,00
60,00	206,00	1,09	1,12	1,13	0,10	0,10	0,10	1690,00	8,00	162,02	13,28	170,04
62,00	206,00	1,18	1,21	1,23	0,12	0,12	0,12	1665,00	8,00	143,57	11,85	170,09
65,00	206,00	1,28	1,30	1,32	0,12	0,13	0,13	1652,00	8,00	118,73	9,76	170,15
68,00	206,00	1,42	1,46	1,46	0,14	0,14	0,14	1634,00	8,00	109,63	7,50	170,17
70,00	206,00	1,48	1,51	1,52	0,15	0,16	0,15	1613,00	8,00	99,45	6,77	170,19
72,00	206,00	1,59	1,63	1,63	0,16	0,17	0,17	1585,00	8,00	91,40	6,00	170,21
75,00	206,00	1,32	1,35	1,37	0,13	0,14	0,14	1561,79	8,00	90,83	5,42	170,21
80,00	206,00	1,39	1,43	1,44	0,15	0,15	0,15	1536,17	8,00	58,31	5,38	170,27
85,00	206,00	1,47	1,52	1,52	0,16	0,17	0,16	1508,06	8,00	58,31	3,25	170,27
90,00	206,00	1,56	1,61	1,61	0,18	0,18	0,18	1477,29	8,00	20,54	3,25	170,34
95,00	206,00	1,65	1,70	1,71	0,19	0,20	0,20	1444,07	8,00	20,54	1,08	170,34
100,00	206,00	1,74	1,80	1,80	0,21	0,22	0,21	1408,61	8,00	19,06	1,08	170,34

Potencia IN Trifásica (W)	Pérdidas aparentes	Pérdidas del estator	Pérdidas de viento y fricción	Pérdidas en el núcleo	Pérdidas del rotor	Pérdidas por carga parásita Corregidas	Pérdidas adicionales IEC60034	Pérdidas por carga parásita	Pérdidas por carga parásita asumidos	Pérdidas totales	Potencia OUT con pérdidas (W)	Pérdidas totales asumidas	Potencia OUT con pérdidas asumidas (W)	Eficiencia por pérdidas (%)	Eficiencia por pérdidas residuales asumidas (%)
169,84	20,14	14,21	6,02	20,23	35,42	0,00	0,00	225,57	2,55	301,45	-131,61	78,42	91,42	113,23	71,83
169,87	22,69	7,11	6,02	13,12	21,31	0,00	0,00	194,73	2,55	242,28	-72,41	50,10	119,77	113,23	71,83
169,89	22,47	7,16	6,02	13,18	21,50	1,70	0,00	195,27	2,55	47,86	122,03	50,40	119,48	113,23	71,83
169,89	22,40	7,12	6,02	13,14	21,43	1,68	0,00	195,20	2,55	47,71	122,18	50,26	119,63	113,18	71,92
169,90	22,06	7,11	6,02	13,12	21,39	1,62	0,00	195,47	2,55	47,64	122,26	50,18	119,71	112,99	71,96
169,91	20,54	7,20	6,02	13,21	21,74	1,46	0,00	197,54	2,55	48,17	121,74	50,72	119,19	112,09	71,65
169,92	19,58	7,31	6,02	13,33	22,30	1,39	0,00	199,29	2,55	48,95	120,97	51,50	118,42	111,52	71,19
169,94	17,26	7,54	6,02	13,55	23,07	1,27	0,00	202,85	2,55	50,18	119,76	52,73	117,21	110,16	70,47
169,94	15,86	7,86	6,02	13,88	24,38	1,26	0,00	206,21	2,55	52,13	117,81	54,68	115,26	109,33	69,32
169,95	15,10	8,56	6,02	14,57	26,88	1,21	0,00	210,87	2,55	56,02	113,93	58,57	111,38	108,89	67,04
169,95	14,31	9,68	6,02	15,70	30,36	1,18	0,00	217,41	2,55	61,76	108,19	64,31	105,64	108,42	63,66
169,97	9,72	10,68	6,02	16,69	33,07	1,15	0,00	226,71	2,55	66,45	103,52	69,00	100,97	105,72	60,90
170,00	2,14	11,55	6,02	17,57	35,85	1,00	0,00	238,85	2,55	70,98	99,02	73,53	96,47	101,26	58,25
170,04	8,02	14,20	6,02	20,22	42,71	0,83	0,00	245,17	2,55	83,15	86,89	85,70	84,34	95,28	51,10
170,09	26,52	16,70	6,02	22,72	49,22	0,66	0,00	238,22	2,55	94,66	75,43	97,21	72,88	84,41	44,35
170,15	51,42	19,50	6,02	25,51	55,30	0,45	0,00	225,05	2,55	106,32	63,83	108,87	61,28	69,78	37,52
170,17	60,54	24,07	6,02	30,09	64,86	0,26	0,00	234,66	2,55	125,03	45,14	127,59	42,59	64,42	26,53
170,19	70,74	26,04	6,02	32,06	69,75	0,22	0,00	233,32	2,55	133,87	36,32	136,42	33,77	58,44	21,34
170,21	78,81	30,15	6,02	36,16	78,72	0,17	0,00	242,45	2,55	151,05	19,16	153,60	16,61	53,70	11,26
170,21	79,38	20,79	6,02	26,81	63,83	0,14	0,00	208,28	2,55	117,45	52,76	120,00	50,21	53,37	31,00
170,27	111,97	23,13	6,02	29,14	69,56	0,14	0,00	186,15	2,55	127,85	42,43	130,40	39,87	34,24	24,92
170,27	111,97	25,84	6,02	31,85	75,95	0,05	0,00	197,96	2,55	139,66	30,62	142,21	28,06	34,24	17,98
170,34	149,80	28,96	6,02	34,97	83,01	0,05	0,00	173,49	2,56	152,95	17,39	155,51	14,83	12,06	10,21
170,34	149,80	32,44	6,02	38,46	90,56	0,01	0,00	188,01	2,56	167,47	2,86	170,03	0,31	12,06	1,68
170,34	151,28	36,22	6,02	42,23	98,43	0,00	0,00	201,96	2,56	182,90	-12,56	185,45	-15,11	11,19	-7,37

Tabla 33: Cálculos de potencias, pérdidas, correcciones y eficiencia en la prueba con carga simulado de la metodología propuesta en base a la IEEE1459 más las pérdidas. Eficiencia por pérdidas se refiere a la calculada usando el método B del IE IEEE112. La columna Eficiencia por pérdidas residuales asumidas, de acuerdo al método De pérdidas PLL por pérdidas asignadas del IE IEC60034-2-1 (Sección 3.3.3.5.2.1) Fuente: Autor

9.14. Anexo N

Torque (Nm)	Potencia Aparente (W)	Potencia Out (W)	Ef. Aparente Tradicional (%)
19,00	147,26	192,36	130,63
18,90	147,26	192,29	130,57
18,56	147,26	191,96	130,35
17,62	147,26	190,46	129,33
17,20	147,26	189,50	128,68
16,40	147,26	187,20	127,12
16,00	147,26	185,81	126,17
15,80	147,26	185,05	125,66
15,60	147,26	184,26	125,12
14,60	147,27	179,69	122,02
13,28	147,27	172,15	116,89
11,85	147,28	162,02	110,00
9,76	147,30	143,57	97,46
7,50	147,33	118,73	80,59
6,77	147,34	109,63	74,41
6,00	147,35	99,45	67,50
5,42	147,36	91,40	62,03
5,38	147,36	90,83	61,64
3,25	147,39	58,31	39,56
3,25	147,39	58,31	39,56
1,08	147,43	20,54	13,93
1,00	147,43	19,06	12,93

Torque Nm	Potencia Activa (W)	Potencia Out (W)	Ef. Aparente IEEE1459 (%)	Error porcentual TRADICIONAL
19,00	169,89	192,36	113,23	13,32
18,90	169,89	192,29	113,18	13,32
18,56	169,90	191,96	112,99	13,32
17,62	169,91	190,46	112,09	13,33
17,20	169,92	189,50	111,52	13,34
16,40	169,94	187,20	110,16	13,34
16,00	169,94	185,81	109,33	13,35
15,80	169,95	185,05	108,89	13,35
15,60	169,95	184,26	108,42	13,35
14,60	169,97	179,69	105,72	13,36
13,28	170,00	172,15	101,26	13,37
11,85	170,04	162,02	95,28	13,38
9,76	170,09	143,57	84,41	13,40
7,50	170,15	118,73	69,78	13,41
6,77	170,17	109,63	64,42	13,42
6,00	170,19	99,45	58,44	13,42
5,42	170,21	91,40	53,70	13,43
5,38	170,21	90,83	53,37	13,43
3,25	170,27	58,31	34,24	13,44
3,25	170,27	58,31	34,24	13,44
1,08	170,34	20,54	12,06	13,45
1,00	170,34	19,06	11,19	13,45

Torque (Nm)	Potencia In (W)	Potencia Out (w)	Eficiencia METODO B (%)	Error porcentual IEEE1459	Error porcentual TRADICIONAL
19,00	276,17	554,26	96,68	14,62	25,99
18,90	275,45	551,34	96,29	14,92	26,26
18,56	275,09	541,42	96,47	14,61	25,99
17,62	276,88	513,42	96,18	14,20	25,64
17,20	279,02	500,06	95,95	13,97	25,44
16,40	283,30	475,73	95,71	13,12	24,71
16,36	289,37	472,43	95,24	12,89	24,51
16,00	301,85	458,38	94,42	13,29	24,86
15,80	321,12	448,52	93,45	13,81	25,32
15,60	337,18	440,29	92,82	12,20	23,93
14,60	350,74	408,73	91,98	9,17	21,31
13,28	388,91	366,57	90,28	5,26	17,93
11,85	421,74	322,21	88,71	5,09	8,99
9,76	455,64	263,35	87,78	25,79	8,92
7,50	506,30	200,17	86,46	34,21	16,20
6,77	526,64	178,36	85,19	45,78	26,21
6,00	566,60	155,33	83,40	55,30	34,45
5,42	470,57	138,26	82,77	55,10	34,28
5,38	496,26	134,99	81,21	137,16	105,29
3,25	524,54	80,03	79,50	132,17	100,97
3,25	555,30	78,40	77,63	543,82	457,24
1,00	621,04	24,85	42,86	283,14	231,61

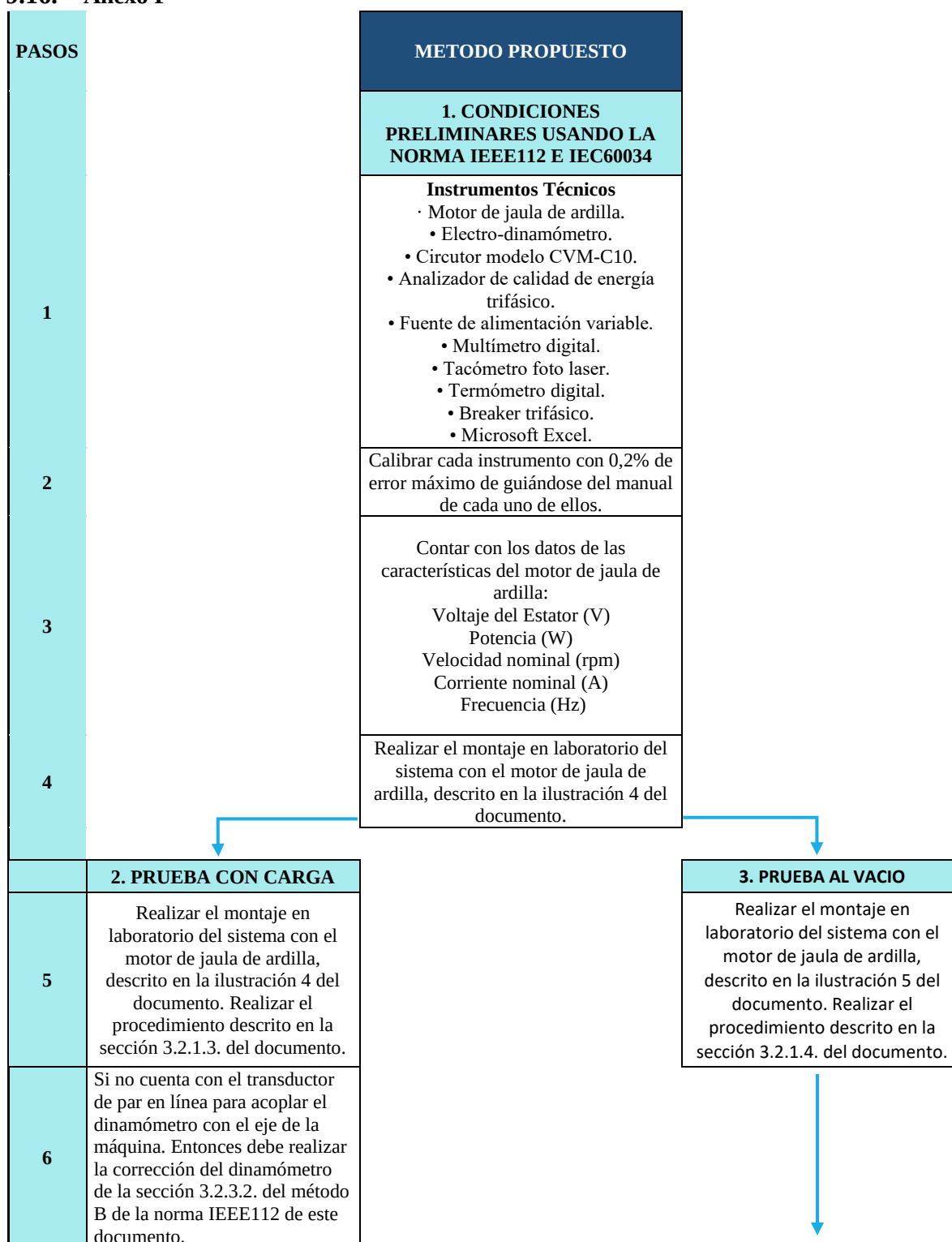
Torque (Nm)	Potencia In (W)	Potencia Out (W)	Eficiencia IEC 60034 (%)	Error porcentual IEEE1459	Error porcentual TRADICIONAL
19,00	359,63	381,74	106,15	6,25	18,74
18,90	370,00	385,53	104,20	7,94	20,20
18,56	365,00	378,31	103,65	8,27	20,49
17,62	359,06	359,74	100,19	10,62	22,53
17,20	328,90	358,42	108,98	2,28	15,32
16,40	394,53	341,94	86,67	21,32	31,82
16,36	359,63	341,76	95,03	13,08	24,68
16,00	300,00	336,11	112,04	2,89	10,84
15,80	251,37	331,27	131,79	21,56	5,33
15,60	251,52	327,73	130,30	23,25	6,79
14,60	327,17	306,75	93,76	7,41	19,79
13,28	343,03	278,88	81,30	14,68	26,10
11,85	376,53	249,14	66,17	21,61	32,11
9,76	383,53	205,94	53,69	23,05	33,37
7,50	312,50	158,34	50,67	21,35	31,90
6,77	201,97	142,97	70,79	21,14	4,88
6,00	423,84	127,46	30,07	44,00	51,52
5,42	284,75	115,63	40,61	23,91	34,12
5,38	719,92	117,50	16,32	52,34	58,74
3,25	323,47	70,70	21,86	36,18	44,75
3,25	413,29	69,89	16,91	40,24	21,38
1,08	936,86	24,20	2,58	76,91	80,01

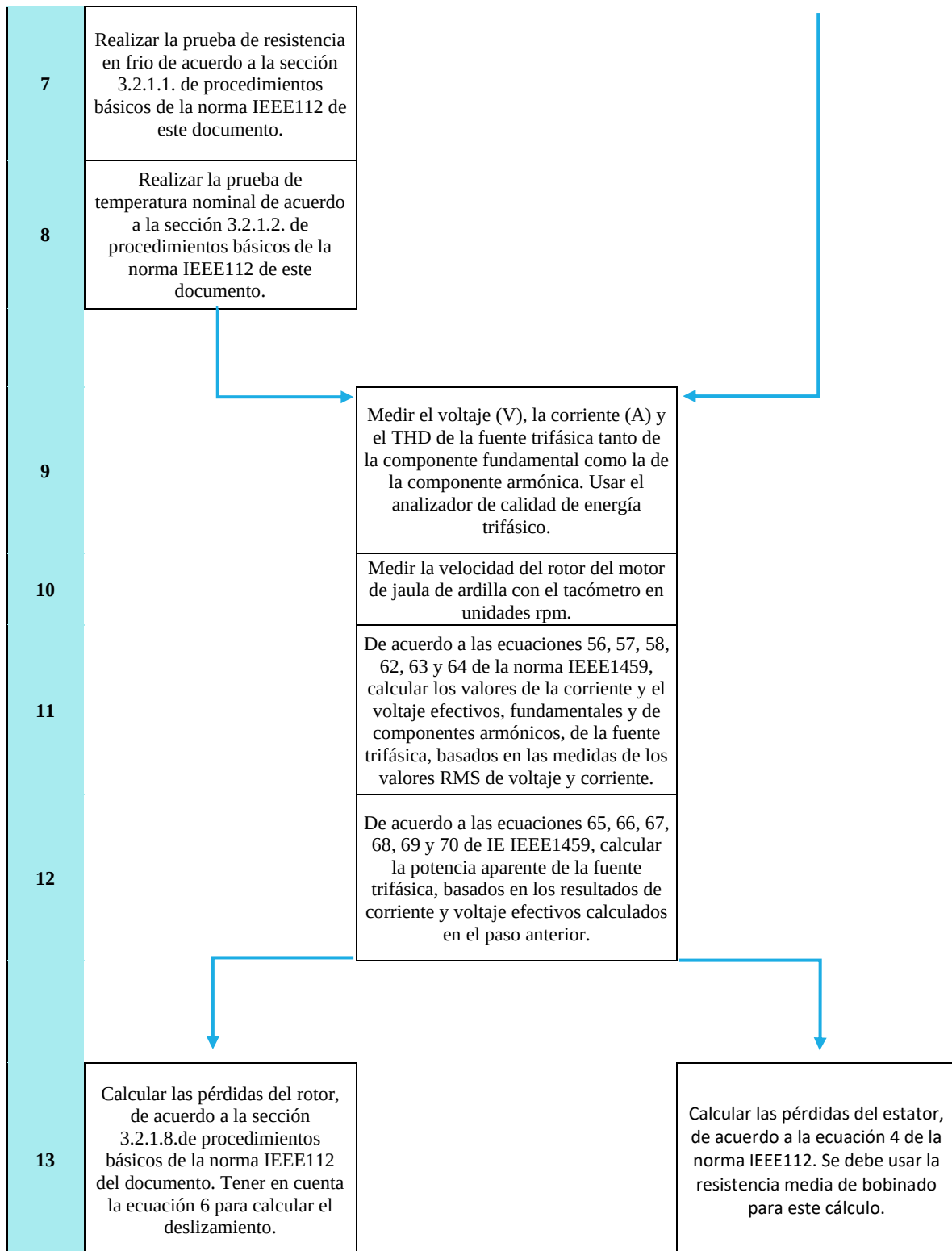
Torque (Nm)	Potencia In (W)	Potencia Out (w)	Eficiencia IEEE1459 Con Pérdidas (%)	Error porcentual IEEE1459	Error porcentual TRADICIONAL
19,00	169,89	192,36	73	35,40	50,77
18,90	169,89	192,29	73	35,30	50,67
18,56	169,90	191,96	73	35,15	50,52
17,62	169,91	190,46	73	34,91	50,29
17,20	169,92	189,50	73	34,99	50,37
16,40	169,94	187,20	72	34,84	50,23
16,36	169,94	185,81	71	35,40	50,80
16,00	169,95	185,05	68	37,24	52,64
15,80	169,95	184,26	65	40,08	55,49
15,60	169,97	179,69	62	41,16	56,58
14,60	170,00	172,15	60	41,20	56,64
13,28	170,04	162,02	52	45,02	60,47
11,85	170,09	143,57	46	45,94	61,41
9,76	170,15	118,73	39	44,41	59,90
7,50	170,17	109,63	28	56,85	72,35
6,77	170,19	99,45	23	61,31	76,81
6,00	170,21	91,40	13	76,69	92,19
5,42	170,21	90,83	32	39,56	55,07
5,38	170,27	58,31	26	23,59	39,12
3,25	170,27	58,31	19	43,87	59,39
3,25	170,34	20,54	11	5,12	20,66
1,08	170,34	19,06	-6	155,02	170,56

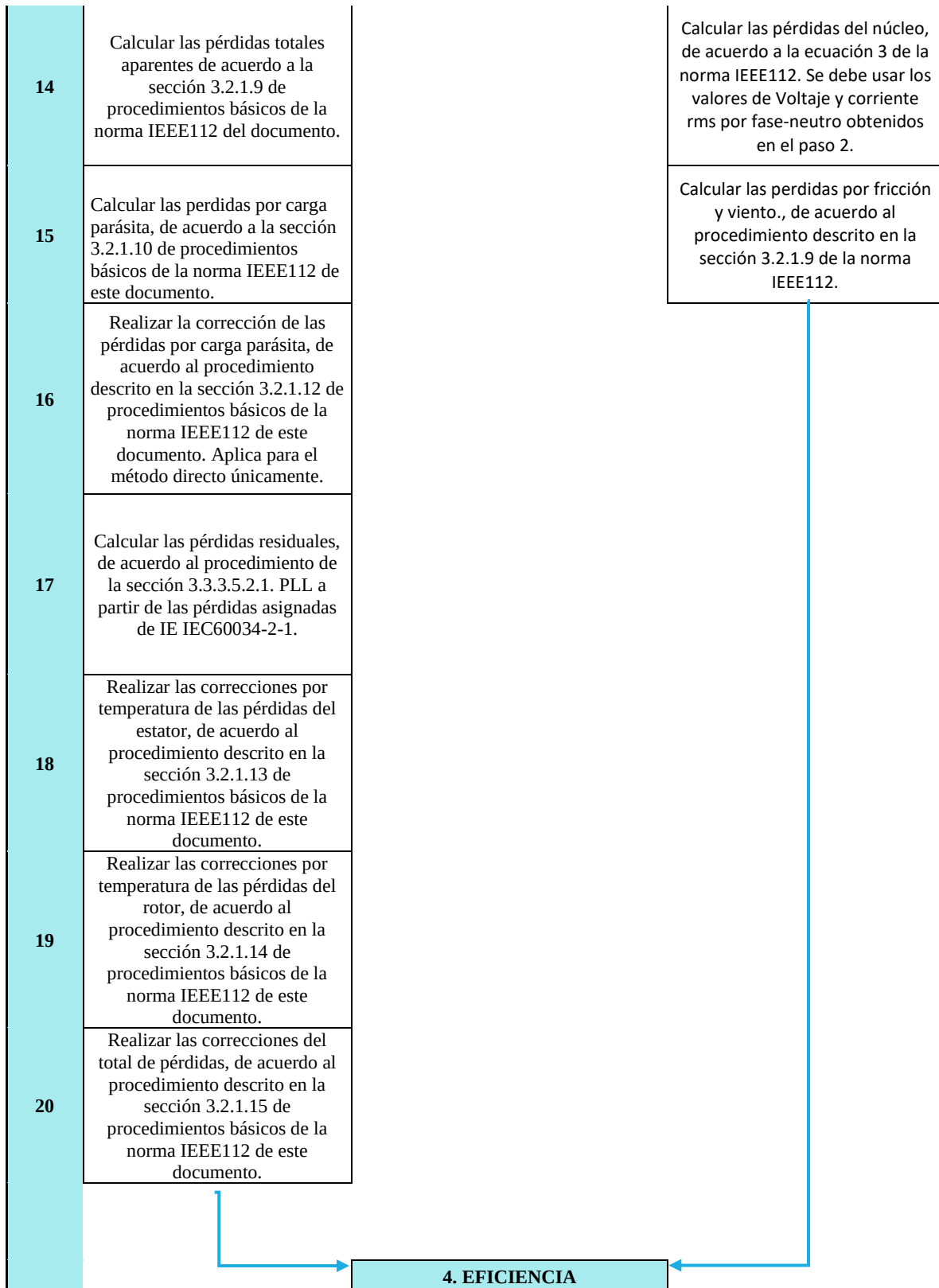
	Datos exactos y precisos
	Datos exactos e imprecisos
	Datos inexactos e imprecisos

Tabla 34: Espectro por color de precisión y exactitud del total de los valores de eficiencia determinada por el método tradicional, método aplicando el IE IEEE1459, método B de IE IEEE112, método Reh-star de IE IEC60034-2-1 y método propuesto aplicando el IE IEEE1459 más pérdidas del motor. (Measures, 2012) Fuente: Autor

9.16. Anexo P







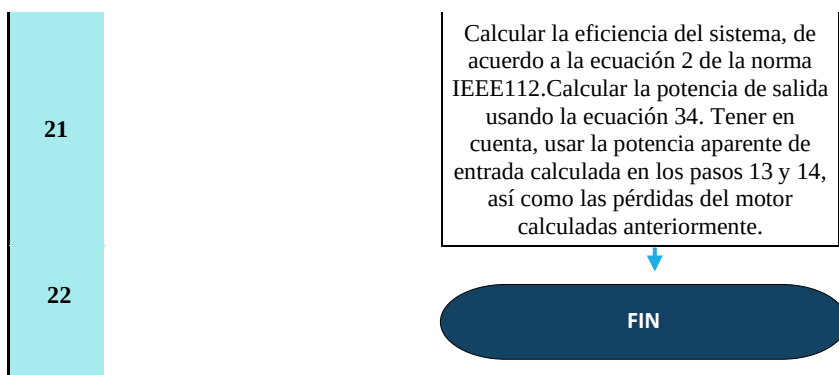


Tabla 36: Metodología propuesta para la evaluación de eficiencia energética en motores de jaula de ardilla para aplicar en un laboratorio real a partir las normas IEEE112, IEC60034-2-1 e IEEE1459-2010. Fuente: Autor.

10.Referencias

- A. De Almeida, F. F. (2012). *Technical and Economical Considerations on Super High-Efficiency Three-Phase Motors*. IEEE.
- Bogotá, S. G. (2001). Ley N° 697, registro distrital 44573. *Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones*. Bogotá.
- Bojacá, B. F. (2010). *EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS ADICIONALES EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN*. BOGOTÁ.
- Camilo Andrés Cortés, J. W. (2008). *Evaluación de los métodos para la determinación de las pérdidas adicionales en los motores de inducción*.
- Chapman, S. J. (2012). *MÁQUINAS ELÉCTRICAS*. México, D.F.: Mc Graw Hill Educación.
- DÍAZ, N. C. (2014). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SERVICIOS DE MEDICIÓN DE CONSUMO*.
- Dirección Ejecutiva de Estudios Económicos de Banco Davivienda. (2016). *Colombia perspectivas macroeconómicas 2016 – 2017*. Obtenido de www.davivienda.com:
<https://www.davivienda.com/wps/wcm/connect/c50330b0-4d2a-481a-96fd-94fe0904f723/Colombia+-+Perspectivas+Macroecon%C3%B3micas+2017.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=c50330b0-4d2a-481a-96fd-94fe0904f723>
- energías, G. d. (2010). *Eficiencia energética en transformadores eléctricos*. Obtenido de <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/transformadores.pdf>
- energías, G. d. (2010). *Evaluación energética de torres de enfriamiento*. Obtenido de <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/torres.pdf>
- energías., G. d. (2010). *Eficiencia energética en motores eléctricos*. Obtenido de <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/motores.pdf>
- Festo, L. V. ((8221-00)). *Four-Pole Squirrel-Cage Induction Motor 579491 (8221-00)*.
- Forero-García, E. (2021). *ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS IN NONLINEAR TRIPHASIC SYSTEMS USING IEEE 1459-2010*. Bogotá.
- Galindo, R. B. (2010). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS NORMAS IEC60034-2-1 Y IEEE112*. SANTIAGO DE CALI.
- IEC. (2004). *IEC 60034: International standard Rotating electrical machines*.
- IEC. (2007). *Standard 600034-2-1, Rotating Electrical Machines. Part 2-1:Standard for determining losses and efficiency from tests excluding machines for traction vehicles*. EU: Switzerland.
- IEEE. (2004). *IEEE112 Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*.

- IEEE. (2010). *IEEE 1459 Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*. 9th Edition.
- Joan S. Chamorro, D. M. (2012). *Evaluación y comparación de los métodos IEC 60034-2, IEEE112 y CSA390 para la medición de la eficiencia energética en motores de inducción de baja potencia*. CALI.
- LabVolt_Series, F. (s.f.). *Datasheet Four-Pole Squirrel-Cage Induction Motor 579491 (8221-00)*.
- Measures, I. B. (2012). *International vocabulary of metrology - Basic and*. JCGM 200:2012.
- Metodología de eficiencia energética en la industria* . (s.f.). Obtenido de energypedia.
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2017). *Reglamento Técnico de Etiquetado - RETIQ*. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/retiq>
- MORENO, A. F. (E 2014). *MONOGRAFÍA PASANTÍA EMPRESARIAL*.
- NEMA. (2016). *NEMA MG1: Motors and Generators* .
- Onofre A. Morfín1, C. E.-C. (2012). *The squirrel-cage induction motor model and its parameter identification via steady and dynamic tests* . Taylor & Francis.
- PEDRAZA, Y. A. (2012). *EVALUACIÓN Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO DEL EDIFICIO DE LA SEDE CENTRAL DE*. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9503/FajardoYInnette2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- RAMÍREZ, B. J. (2010). *Análisis comparativo de las normas iec60034-2-1 y ieee112 para determinar la eficiencia de motores de inducción en laboratorio*.
- Ramírez, C. M. (2013). Normas de Eficiencia Energética de Motores de Inducción, ¿Está Preparada Latinoamérica? . *Tecno Lógicas*, Vol 30, 117–147.
- Ramírez-Echavarría2, C. M.-P. (2013). *Normas de Eficiencia Energética de*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/n30/n30a07.pdf>
- S.A, C. (2004). *strategia de uso racional de energía en el sector industrial colombiano informe final*. Obtenido de <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/estrategiaUREind.pdf>
- Saidur, R. (2010). A review on electrical motors energy use and energy savings. *Renewable and sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp. 877-89.
- Secretaria General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (1994). Ley N° 142. . *Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones*. Bogotá D.C.
- UPM. (2015). *PLAN ENERGETICO NACIONAL COLOMBIA: IDEARIO ENERGÉTICO 2050*. Bogotá.
- UPME. (2010). *Plan de eficiencia energética - plan de acción 2010-2015*. Obtenido de https://www.minminas.gov.co/documents/10180/558752/Informe_Final_Consultoria_Plan_de_accion_Proure.pdf/e8cdf796-d7b1-4bb1-90b9-e756c7f48347

UPME. (2015). *Resolución 41012 del 18 de septiembre de 2015 - Ministerio de Minas y Energía de Colombia: Reglamento Técnico de Etiquetado.*

Valencia, J. G. (2016). *Proyección de Demanda de Energía Eléctrica y Potencia Máxima en Colombia Revisión junio de 2016.* Obtenido de UPME:
http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/UPME_Proyeccion_Demanda_Energia_Electrica_Junio_2016.pdf