

**EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS
PÉRDIDAS ADICIONALES EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN**

Ing. FILIBERTO BOJACÁ BUCHE



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADOS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Bogotá D.C., Nov. 2010

**EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS
PÉRDIDAS ADICIONALES EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN**

Ing. FILIBERTO BOJACÁ BUCHE

Código 02298333

DIRIGIDO POR

Ing. JAIME ALEMÁN CASAS

**Trabajo de grado para optar el título de
Magister en Ingeniería Eléctrica**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADOS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Bogotá D.C., Nov.2010

CONTENIDO

CONTENIDO	3
INTRODUCCIÓN	8
0.1 Antecedentes y justificación.....	8
0.2 Identificación del problema	11
0.3 Objetivos.....	12
0.4 Alcances y limitaciones.....	13
CAPÍTULO 1: ANÁLISIS CONCEPTUAL DEL PROBLEMA.....	14
1.1 Marco teórico	14
1.2 Marco normativo	16
1.3 Clasificación de los motores según su eficiencia.....	18
1.4 Métodos para determinación de la eficiencia.....	32
1.5 Comparación de las metodologías IEC e IEEE	46
1.6 Comentarios acerca de la comparación entre las normas IEEE 112 e IEC 60034-2-1	60
1.7 Validación práctica de las diferencias de las normas	62
1.8 Comparación de los resultados prácticos de las dos normas	63
CAPÍTULO 2: MÉTODOS PARA DETERMINAR LAS PÉRDIDAS ADICIONALES	69
2.1 Análisis conceptual.....	69
2.2 Análisis normativo.....	72
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN PRÁCTICA DE LOS MÉTODOS PARA DETERMINAR PÉRDIDAS ADICIONALES EN CARGA	93
3.1 Selección y diseño de pruebas	93

3.2	Ejecución de las pruebas.....	93
3.3	Evaluación técnica.....	98
3.4	Evaluación económica.....	101
CAPITULO 4: CONCLUSIONES		110
4.1	Capacidad para la ejecución de pruebas de eficiencia	110
4.2	Estudio alineado con otros trabajos nacionales e internacionales	110
4.3	Oportunidad y pertinencia del estudio	113
4.4	Base para continuar línea de investigación	114
4.5	Inversiones para dotación de laboratorios y costos de ejecución de pruebas 114	
4.6	Participación con criterio en decisiones de normalización y regulación en el país y la región	115

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Eficiencia a plena carga de motores Energy Efficient abiertos	19
Tabla 2. Eficiencia a plena carga de motores Energy Efficient cerrados	20
Tabla 3. Eficiencia a plena carga de motores abiertos Premium Efficiency con tensión nominal 600 V ó menos.....	21
Tabla 4. Eficiencia a plena carga de motores cerrados Premium Efficiency para motores con tensión nominal 600 V ó menos	22
Tabla 5. Eficiencia a plena carga de motores Premium Efficiency para motores con tensión nominal 5000 V ó menos.....	23
Tabla 6. Límites nominales de eficiencia para Standard Efficiency (IE1) 50 Hz	25
Tabla 7. Límites nominales para Standard Efficiency (IE1) 60 Hz	26
Tabla 8. Límites nominales para High Efficiency (IE2) 50 Hz	27
Tabla 9. Límites nominales para High Efficiency (IE2) 60 Hz	28
Tabla 10. Límites nominales para Premium Efficiency (IE3) 50 Hz	29
Tabla 11. Límites nominales para Premium Efficiency (IE3) 60 Hz	30
Tabla 12. Comparación categorías de eficiencia NEMA / IEC	31
Tabla 13. Criterios para selección del método para determinación de la eficiencia	36
Tabla 14. Espectro de motores probados y evaluados con los métodos IEC e IEEE	63
Tabla 15. Resultados comparativos pérdidas y eficiencia motores 2 polos	64
Tabla 16. Resultados comparativos pérdidas y eficiencia motores 4 polos	65
Tabla 17. Resultados comparativos pérdidas y eficiencia motores 6 polos	66
Tabla 18. Comparación componentes de pérdidas.....	67
Tabla 19. Componentes de pérdidas	68
Tabla 20. Resistencias necesarias para la prueba Eh-star.....	95

Tabla 21. Resultados comparativos de pérdidas adicionales	96
Tabla 22. Resultados comparativos de pérdidas adicionales	98
Tabla 23. Inversiones para laboratorio de pruebas de eficiencia	104
Tabla 24. Inversiones adicionales para método Eh-Star.....	105
Tabla 25. Inversiones adicionales para la prueba de rotor removido y rotación inversa	105
Tabla 26. Inversiones totales laboratorio de pruebas eficiencia	106
Tabla 27. Costos fijos del laboratorio de pruebas	106
Tabla 28. Costo adicional para métodos de medición directa de pérdidas adicionales.....	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Regresión para suavización pérdidas residuales.....	74
Figura 2. Curva para asignar pérdidas adicionales en carga.....	82
Figura 3. Diagrama del montaje para la prueba Eh-star	83
Figura 4. Base instalada de motores en el mundo.....	102

INTRODUCCIÓN

0.1 Antecedentes y justificación

Diseñar, construir, especificar y operar motores de alta eficiencia significa aspirar al logro de metas como la disminución de costos energéticos, mejor aprovechamiento de equipos, retorno más apropiado de las inversiones y la disminución de impactos en el medio ambiente.

En un mundo como el actual de economía globalizada donde la competencia es más fuerte, donde es necesario realizar grandes esfuerzos de racionalización al interior de la empresas, donde se busca cada día mejorar la productividad, y donde todo está condicionado a un menor impacto sobre el medio ambiente, el desarrollo de tales motores y su aplicación es un tema que cada día toma mayor vigencia.

Con relación al tema de los motores de alta eficiencia es importante destacar aspectos como los siguientes:

- Para los usuarios, particularmente los denominados grandes consumidores, los costos de la energía eléctrica son motivo de permanente atención. Además en las instalaciones eléctricas de estos grandes consumidores los equipos que absorben mayor cantidad de energía son los motores eléctricos; por tanto cualquier esfuerzo para minimizar su consumo se constituye en una forma de racionalizar los costos.

- En los Estados Unidos ya hace bastante tiempo (en los años 1990) se constituyó en exigencia la utilización de motores que superen unos límites establecidos de eficiencia. Esto ha motivado a los fabricantes de motores a desarrollar líneas de motores que cumplan con dicha exigencia para poder tener participación en ese gran mercado o ampliar su participación en el mismo.

- Los países europeos siguieron años después (en los años 2000) esta tendencia, y en un acuerdo entre los más importantes fabricantes de motores se propusieron disminuir en pocos años la comercialización de motores de baja eficiencia.

- A la fecha ya otros países han seguido este ejemplo incorporándolo como política nacional y la utilización de motores de alta eficiencia se ha venido ampliando mucho más. De hecho ya hay experiencias cercanas como Chile y Perú, países que han aprobado leyes que establecen que en las etiquetas de los motores es obligatorio declarar el nivel de eficiencia; lo cual representa un primer paso hacia medidas más restrictivas en cuanto al uso de motores con bajos niveles de eficiencia. Igualmente en Colombia se está caminando por la misma senda y está a punto de ser emitido un Reglamento Técnico de Etiquetado de productos finales de consumo de energía eléctrica, entre los cuales están los motores eléctricos.

- Cada día cobran mayor importancia diferentes aspectos relacionados con el medio ambiente. Así, recientemente se han desarrollado legislaciones relacionadas con lo ambiental, se han creado entidades certificadoras, y las empresas que suministran bienes o servicios deben obtener dichas certificaciones como condición para su operación. En ese contexto, las empresas que producen, suministran o consumen energía eléctrica están

comprometidas a implementar acciones concretas de gestión encaminadas a disminuir sus impactos frente al medio ambiente.

En Colombia la discusión sobre motores eficientes comenzó con motivo de la expedición de la Ley URE (Ley 697 de 2001) que declaró el Uso Racional de la Energía como un asunto público de interés nacional; designó al Ministerio de Minas y Energía como la entidad responsable de la promoción, organización y seguimiento de proyectos URE; definió estímulos para el desarrollo de trabajos relacionados con URE y, en general, estableció las bases para la promoción del tema.

Entretanto en el contexto internacional se han desarrollado normas técnicas asociadas con la eficiencia de los motores eléctricos. De éstas, las más destacadas en tiempos recientes son:

- Actualización de la norma IEC 60034-2, que incluye diferentes métodos para determinación de la eficiencia,
- Publicación de la norma IEC 60034-30, que clasifica los motores eléctricos en categorías de acuerdo con su nivel de eficiencia.

En consecuencia, es indispensable iniciar un trabajo orientado a identificar procedimientos de ensayo que permitan la determinación real de la eficiencia de motores eléctricos cumpliendo con las condiciones que exigen las normas internacionales y teniendo en cuenta que su implementación y utilización sean tecnológicamente posibles.

0.2 Identificación del problema

Con base en lo expuesto anteriormente, las regiones y los países han comenzado a desarrollar normas y legislaciones con el objetivo de limitar el uso de motores eléctricos que tengan niveles bajos de eficiencia. Latinoamérica en general y Colombia en particular no han sido ajenos a este proceso y están llevando a cabo procesos en este sentido. Sin embargo, existen vacíos respecto a estos temas y el presente trabajo pretende llenarlos. Algunos de estos vacíos son:

- Falta de claridad en los criterios, considerados apropiados, para la selección del método de determinación de pérdidas en diferentes casos. Esto ha conducido a que, en el momento de definir una norma o una legislación al respecto, las decisiones se tomen con base en criterios que son del interés comercial de los participantes. Tal es el caso de la comisión 152 de COPANT (Comisión Panamericana de Normas Técnicas), entidad que después de cinco años de discusión no tiene aun una norma vigente para la clasificación de los motores según la eficiencia y método de determinación de la misma.
- Las normas técnicas consideran distintos métodos para la determinación de las pérdidas en motores eléctricos. Uno de los elementos primordiales que hacen diferentes unos métodos de otros es el relacionado con la determinación de las pérdidas adicionales. Con relación a este tema se han realizado estudios en diferentes países, pero en Colombia no ha habido suficiente evaluación ni validación de métodos de medición de estas pérdidas; por tanto, no se tiene experiencia en la utilización de estas metodologías y se desconocen sus costos y posibilidades reales de aplicación

0.3 Objetivos

0.3.1 Objetivo General

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.

0.3.2 Objetivos Específicos

Para lograr el objetivo general planteado, se definieron los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar las bases teóricas que sustentan los diferentes métodos de determinación de pérdidas en motores eléctricos y desarrollar una metodología para su aplicación, utilizando métodos mencionados en normas técnicas publicadas recientemente
- Validar resultados mediante pruebas de laboratorio que permitan un adecuado grado de confiabilidad.
- Analizar cuidadosamente las condiciones de ejecución, la instrumentación y los niveles de incertidumbre asociados al diseño e implementación de las pruebas.
- Evaluar los requerimientos de los ensayos de manera que sea factible definir la viabilidad de la aplicación de los métodos y la identificación de los más adecuados para el medio colombiano con base en criterios técnicos y económicos.

0.4 Alcances y limitaciones

Como entregable de este trabajo se elabora este documento, el cual presenta las diferencias entre los distintos métodos planteados en las normas para la determinación de pérdidas en motores eléctricos haciendo énfasis en los aspectos relacionados con las pérdidas adicionales.

En el desarrollo del proyecto se analizaron las condiciones técnicas y económicas necesarias para la ejecución de las pruebas, que puedan servir como información de referencia para procesos de toma de decisiones respecto a la implementación de laboratorios para la realización de los ensayos.

El proyecto se apoyó en normas técnicas nacionales e internacionales, en estudios similares realizados en otros países y, en general, en literatura relacionada con la eficiencia de motores eléctricos y la determinación de sus pérdidas.

Los análisis de datos, así como las conclusiones planteadas, tienen un alcance global en cuanto a los aspectos técnicos, y nacional en cuanto a las posibilidades de ponerlas en práctica.

Dadas las limitaciones en infraestructura que se tienen actualmente en Colombia, el trabajo está limitado a motores de potencias pequeñas y medianas. Sin embargo, se presentan modelos técnicamente adecuados para la evaluación de motores de diferentes tamaños.

CAPÍTULO 1: ANÁLISIS CONCEPTUAL DEL PROBLEMA

1.1 Marco teórico

La eficiencia de un motor está definida como la relación entre la potencia que la máquina entrega en el eje P_2 y la potencia que toma de la red a la cual está conectado P_1 .

$$\eta = P_2 / P_1 \quad (1)$$

Para el análisis de la eficiencia de los motores es común presentar esta expresión en la forma

$$\eta = (P_1 - P_T) / P_1 \quad (2)$$

Donde P_T son las pérdidas totales de la máquina.

Esta expresión, más que ser una transformación matemática de la primera, es una forma usual para evaluar la eficiencia. En efecto, las metodologías más comunes para la evaluación de la eficiencia se basan en cálculos separados de cada uno de los componentes de pérdidas, incluyendo posteriores correcciones debidas a factores influyentes como la temperatura ambiente, temperatura final de funcionamiento del motor, condiciones del sitio de prueba respecto a condiciones de referencia, etc.

Las componentes de pérdidas consideradas para la evaluación de la eficiencia de un motor son:

- Pérdidas en los devanados del estator. Producidas por el efecto Joule en la resistencia de estos devanados.
- Pérdidas en los devanados del rotor (ó jaula de ardilla). Producidas por efecto Joule y dependientes de la resistencia de estos devanados.
- Pérdidas en el hierro. Producidas por ciclos de histéresis y por corrientes de Foucault en el núcleo tanto del estator como del rotor. También se consideran como pertenecientes a este grupo otras pérdidas debidas a flujos magnéticos y corrientes de fuga que se presentan durante el funcionamiento en partes metálicas tales como la carcasa, los rodamientos y el eje.
- Pérdidas por fricción y ventilación. Corresponden a la suma de las pérdidas por fricción en los rodamientos, más la potencia utilizada para mover el ventilador propio que es, en la mayoría de los casos, la forma de refrigerar el motor.
- Pérdidas adicionales en carga (conocidas como “stray losses” en la literatura en inglés). Se presentan cuando el motor está bajo carga, y son debidas a los armónicos de flujo que generan pérdidas en los conductores y en partes metálicas.

La evaluación precisa de las distintas componentes de pérdidas exige:

- Un conocimiento claro del comportamiento del motor
- La disponibilidad de los medios de prueba y de medición que garanticen la precisión en las medidas
- Procedimientos claros para la ejecución de las pruebas que permitan la evaluación de pérdidas bajo consideración

- Definición de condiciones de referencia que garanticen la reproducibilidad de los resultados
- Cálculos adecuados de las correcciones para referir los resultados a las condiciones de referencia

Con el fin de garantizar estas condiciones, se han desarrollado a lo largo de los años distintas normas técnicas que buscan ser la base para estandarizar las metodologías de prueba, las condiciones de medición y los métodos de cálculo. Sin embargo, como el desarrollo tecnológico no ha sido igual en todas las regiones del mundo, se han desarrollado en paralelo distintas normas técnicas. Este es un fenómeno que se presenta en todos sistemas eléctricos, y obviamente los motores no son la excepción en este aspecto.

Por lo anterior, a continuación se hace un análisis detallado de la normativa más importante disponible para la evaluación de la eficiencia de los motores, y más concretamente de los motores de inducción, que son el foco de este trabajo.

1.2 Marco normativo

La experiencia en el desarrollo, aplicación, pruebas y demás aspectos técnicos de los motores están registrados en normas técnicas, las cuales se han construido con el aporte de muchos técnicos e investigadores alrededor del mundo.

De manera similar a como se ha dado el desarrollo de otros equipos y sistemas de ingeniería, en el caso de los motores existen dos tendencias tecnológicas: Por un lado la línea europea cuyos fundamentos y avances se consignan en las normas IEC (International Electrotechnical Commission), y por otro lado el desarrollo norteamericano que da origen a las normas NEMA (National Electrical

Manufacturers Association) e IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers).

Las normas IEC más importantes para el caso de los motores son:

- IEC 60034. Rotating Electrical Machines
- IEC 60072. Dimensions and output series for rotating electrical machines

En el caso NEMA todos los aspectos tanto eléctricos, mecánicos y de pruebas están incluidos en la norma:

- NEMA MG1. Motors and Generators

Esta norma NEMA se complementa a su vez con normas IEEE, que en el caso concreto de los motores trifásicos es:

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

En estas normas, obviamente se encuentran incluidos los aspectos relacionados con la eficiencia de los motores. Contienen entonces la clasificación de los motores según su nivel de eficiencia y aspectos relacionados con la metodología para su determinación.

A continuación se presenta una descripción de los aspectos más importantes de las normas citadas antes, en lo que a eficiencia se refiere.

1.3 Clasificación de los motores según su eficiencia

1.3.1 Clasificación según norma MEMA MG1

De acuerdo con esta norma, los motores se clasifican en tres categorías, que se han tomado como referencia en las regulaciones americanas, más exactamente las que sirvieron como base para la regulación de los Estados Unidos conocida como EPACT 92, y más recientemente para la restricción del uso de los motores únicamente con nivel de eficiencia “Premium” (ver enseguida la definición).

Las categorías consideradas en esta norma son:

- *Standard*. Son todos los motores cuya eficiencia está por debajo de los valores establecidos para los motores *Energy efficient*, considerados en la Tabla 1 para motores abiertos y en la Tabla 2 para motores cerrados.
- *Energy efficient*. A este grupo pertenecen aquellos motores trifásicos, jaula de ardilla, con tensión nominal 600 V ó menos cuya eficiencia medida como establece la norma misma, es igual ó superior a los valores dados en las Tablas 1 y 2 para motores abiertos y cerrados respectivamente.
- *Nema premium efficiency*. En este grupo la norma establece a su vez dos subgrupos: motores con tensión nominal 600 V ó menos, y motores de media tensión hasta 5000 V. Para el primer grupo establece los valores mínimos de eficiencia que se muestran en las Tablas 3 y 4 para motores abiertos y cerrados respectivamente; y para el segundo grupo se establece valores mínimos de eficiencia indicados en la Tabla 5, la cual incluye motores abiertos y cerrados.

Tabla 1. Eficiencia a plena carga de motores Energy Efficient abiertos¹

Potencia nominal en HP	2 POLOS		4 POLOS		6 POLOS		8 POLOS	
	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima
1,0			82,5	80,0	80,0	77,0	74,0	70,0
1,5	82,5	90,0	84,0	81,5	84,0	81,5	75,5	72,0
2,0	84,0	81,5	84,0	81,5	85,5	82,5	85,5	82,5
3,0	84,0	81,5	86,5	84,0	86,5	84,0	86,5	84,0
5,0	85,5	82,5	87,5	85,5	87,5	85,5	87,5	85,5
7,5	87,5	85,5	88,5	86,5	88,5	86,5	88,5	86,5
10,0	88,5	86,5	89,5	87,5	90,2	88,5	89,5	87,5
15,0	89,5	87,5	91,0	89,5	90,2	88,5	89,5	87,5
20,0	90,2	88,5	91,0	89,5	91,0	89,5	90,2	88,5
25,0	91,0	89,5	91,7	90,2	91,7	90,2	90,2	88,5
30,0	91,0	89,5	92,4	91,0	92,4	91,0	91,0	89,5
40,0	91,7	90,2	93,0	91,7	93,0	91,7	91,0	89,5
50,0	92,4	91,0	93,0	91,7	93,0	91,7	91,7	90,2
60,0	93,0	91,7	93,6	92,4	93,6	92,4	92,4	91,0
75,0	93,0	91,7	94,1	93,0	93,6	92,4	93,6	92,4
100,0	93,0	91,7	94,1	93,0	94,1	93,0	93,6	92,4
125,0	93,6	92,4	94,5	93,6	94,1	93,0	93,6	92,4
150,0	93,6	92,4	95,0	94,1	94,5	93,6	93,6	92,4
200,0	94,5	93,6	95,0	94,1	94,5	93,6	93,6	92,4
250,0	94,5	93,6	95,4	94,5	95,4	94,5	94,5	93,6
300,0	95,0	94,1	95,4	94,5	95,4	94,5		
350,0	95,0	94,1	95,4	94,5	95,4	94,5		
400,0	95,4	94,5	95,4	94,5				
450,0	95,8	95,0	95,8	95,0				
500,0	95,8	95,0	95,8	95,0				

¹ Fuente: Norma NEMA MG1, 2005, Tabla 12-11

Tabla 2. Eficiencia a plena carga de motores Energy Efficient cerrados²

Potencia nominal en HP	2 POLOS		4 POLOS		6 POLOS		8 POLOS	
	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima
1,0	75,5	72,0	82,5	80,0	80,0	77,0	74,0	70,0
1,5	82,5	80,0	84,0	81,5	85,5	82,5	77,0	74,0
2,0	84,0	81,5	84,0	81,5	86,6	84,0	82,5	80,0
3,0	85,5	82,5	87,5	85,5	87,5	85,5	84,0	81,5
5,0	87,5	85,5	87,5	85,5	87,5	85,5	85,5	82,5
7,5	88,5	86,5	89,5	87,5	89,5	87,5	85,5	82,5
10,0	89,5	87,5	89,5	87,5	89,5	87,5	88,5	86,5
15,0	90,2	88,5	91,0	89,5	90,2	88,5	88,5	86,5
20,0	90,2	88,5	91,0	89,5	90,2	88,5	89,5	87,5
25,0	91,0	89,5	92,4	91,0	91,7	90,2	89,5	87,5
30,0	91,0	89,5	92,4	91,0	91,7	90,2	91,0	89,5
40,0	91,7	90,2	93,0	91,7	93,0	91,7	91,0	89,5
50,0	92,4	91,0	93,0	91,7	93,0	91,7	91,7	90,2
60,0	93,0	91,7	93,6	92,4	93,6	92,4	91,7	90,2
75,0	93,0	91,7	94,1	93,0	93,6	92,4	93,0	91,7
100,0	93,6	92,4	94,5	93,6	94,1	93,0	93,0	91,7
125,0	94,5	93,6	94,5	93,6	94,1	93,0	93,6	92,4
150,0	94,5	93,6	95,0	94,1	95,0	94,1	93,6	92,4
200,0	95,0	94,1	95,0	94,1	95,0	94,1	94,1	93,0
250,0	95,4	94,5	95,0	94,1	95,0	94,1	94,5	93,6
300,0	95,4	94,5	95,4	94,5	95,0	94,1		
350,0	95,4	94,5	95,4	94,5	95,0	94,1		
400,0	95,4	94,5	95,4	94,5				
450,0	95,4	94,5	95,4	94,5				
500,0	95,4	94,5	95,8	95,0				

² Fuente: Norma NEMA MG1, 2005, Tabla 12-11

Tabla 3. Eficiencia a plena carga de motores abiertos Premium Efficiency con tensión nominal 600 V ó menos³

Potencia nominal en HP	2 POLOS		4 POLOS		6 POLOS	
	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima
1,0	77,0	74,0	85,5	82,5	82,5	80,0
1,5	84,0	81,5	86,5	84,0	86,5	81,5
2,0	85,5	82,5	86,5	84,0	87,5	81,5
3,0	85,5	82,5	89,5	84,0	88,5	86,5
5,0	86,5	84,0	89,5	84,0	89,5	87,5
7,5	88,5	86,5	91,0	89,5	90,2	88,5
10,0	89,5	87,5	91,7	90,2	91,7	90,2
15,0	90,2	88,5	93,0	91,7	91,7	90,2
20,0	91,0	89,5	93,0	91,7	92,4	91,0
25,0	91,7	90,2	93,6	92,4	93,0	91,7
30,0	91,7	90,2	94,1	93,0	93,6	92,4
40,0	92,4	91,0	94,1	93,0	94,1	93,0
50,0	93,0	91,7	94,5	93,6	94,1	93,0
60,0	93,6	92,4	95,0	94,1	94,5	93,6
75,0	93,6	92,4	95,0	94,1	94,5	93,6
100,0	93,6	92,4	95,4	94,5	95,0	94,1
125,0	94,1	93,0	95,4	94,5	95,0	94,1
150,0	94,1	93,0	95,8	95,0	95,4	94,5
200,0	95,0	94,1	95,8	95,0	95,4	94,5
250,0	95,0	94,1	95,8	95,0	95,4	94,5
300,0	95,4	94,5	95,8	95,0	95,4	94,5
350,0	95,4	94,5	95,8	95,0	95,4	94,5
400,0	95,8	95,0	95,8	95,0	95,8	95,0
450,0	95,8	95,0	96,2	95,4	96,2	95,4
500,0	95,8	95,0	96,2	95,4	96,2	95,4

³ Fuente: Norma NEMA MG1, 2005, Tabla 12-12

Tabla 4. Eficiencia a plena carga de motores cerrados Premium Efficiency para motores con tensión nominal 600 V ó menos⁴

Potencia nominal en HP	2 POLOS		4 POLOS		6 POLOS	
	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima
1,0	77,0	74,0	85,5	82,5	82,5	80,0
1,5	84,0	81,5	86,5	84,0	87,5	85,5
2,0	85,5	82,5	86,5	84,0	88,5	86,5
3,0	86,5	84,0	89,5	87,5	89,5	87,5
5,0	88,5	86,5	89,5	87,5	89,5	87,5
7,5	89,5	87,5	91,7	90,2	91,0	89,5
10,0	90,2	88,5	91,7	90,2	91,0	89,5
15,0	91,0	89,5	92,4	91,0	91,7	90,2
20,0	91,0	89,5	93,0	91,7	91,7	90,2
25,0	91,7	90,2	93,6	92,4	93,0	91,7
30,0	91,7	90,2	93,6	92,4	93,0	91,7
40,0	92,4	91,0	94,1	93,0	94,1	93,0
50,0	93,0	91,7	94,5	93,6	94,1	93,0
60,0	93,6	92,4	95,0	94,1	94,5	93,6
75,0	93,6	92,4	95,4	94,5	94,5	93,6
100,0	94,1	93,0	95,4	94,5	95,0	94,1
125,0	95,0	94,1	95,4	94,5	95,0	94,1
150,0	95,0	94,1	95,8	95,0	95,8	95,0
200,0	95,4	94,5	96,2	95,4	95,8	95,0
250,0	95,8	95,0	96,2	95,4	95,8	95,0
300,0	95,8	95,0	96,2	95,4	95,8	95,0
350,0	95,8	95,0	96,2	95,4	95,8	95,0
400,0	95,8	95,0	96,2	95,4	95,8	95,0
450,0	95,8	95,0	96,2	95,4	95,8	95,0
500,0	95,8	95,0	96,2	95,4	95,8	95,0

⁴ Fuente: Norma NEMA MG1, 2005, Tabla 12-12

Tabla 5. Eficiencia a plena carga de motores Premium Efficiency para motores con tensión nominal 5000 V ó menos⁵

MOTORES ABIERTOS						
Potencia nominal en HP	2 POLOS		4 POLOS		6 POLOS	
	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima
250,0	94,5	93,6	95,0	94,1	95,0	94,1
300,0	94,5	93,6	95,0	94,1	95,0	94,1
350,0	94,5	93,6	95,0	94,1	95,0	94,1
400,0	94,5	93,6	95,0	94,1	95,0	94,1
450,0	94,5	93,6	95,0	94,1	95,0	94,1
500,0	94,5	93,6	95,0	94,1	95,0	94,1

MOTORES CERRADOS						
Potencia nominal en HP	2 POLOS		4 POLOS		6 POLOS	
	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima	Eficiencia nominal	Eficiencia mínima
250,0	95,0	94,1	95,0	94,1	95,0	94,1
300,0	95,0	94,1	95,0	94,1	95,0	94,1
350,0	95,0	94,1	95,0	94,1	95,0	94,1
400,0	95,0	94,1	95,0	94,1	95,0	94,1
450,0	95,0	94,1	95,0	94,1	95,0	94,1
500,0	95,0	94,1	95,0	94,1	95,0	94,1

1.3.2 Clasificación según norma IEC 60034-30

Esta norma surgió recientemente (Octubre.2008) llenando de esta manera el vacío que en este campo existía como contraparte de la norma NEMA MG1 que lo había establecido muchos años atrás.

Aunque no existía una norma IEC, los fabricantes europeos habían establecido entre ellos un acuerdo conocido como Acuerdo CEMEP mediante el cual se comprometieron a eliminar del mercado motores con bajos niveles de eficiencia, y para ello una de las primeras actividades fue justamente el establecimiento de unas categorías de los motores y sus correspondientes límites de eficiencia.

⁵ Fuente: Norma NEMA MG1, 2005, Tabla 12-13

IEC recogió esta experiencia y la tomó como referencia para el desarrollo de la norma IEC 60034-30. En ella se establecen cuatro categorías de motores de acuerdo a su eficiencia, definidas como se indica a continuación:

Designación	Categoría	Definición
IE1	Standard	Motores con una eficiencia nominal a plena carga igual o superior a los límites de la tabla 5.4.2 de la norma IEC 60034-30
IE2	High	Motores con una eficiencia nominal a plena carga igual o superior a los límites de la tabla 5.4.3 de la norma IEC 60034-30
IE3	Premium	Motores con una eficiencia nominal a plena carga igual o superior a los límites de la tabla 5.4.4 de la norma IEC 60034-30
IE4	Super Premium	No tiene aun límites establecidos. Se prevé que puedan ser incorporados en una siguiente edición de la norma IEC 60034-30, y la expectativa es que se puedan reducir las pérdidas en un 15% respecto a las correspondientes al nivel IE3. Es previsible que se requiera una tecnología distinta a la de motores jaula de ardilla para poder alcanzar esta categoría

Los límites de cada una de las categorías tanto para 50 como 60 Hz se muestran a continuación en las Tablas 6 a 11.

Tabla 6. Límites nominales de eficiencia para Standard Efficiency (IE1) 50 Hz⁶

Potencia nominal en kW	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS
	Eficiencia nominal	Eficiencia nominal	Eficiencia nominal
0,75	72,1	72,1	70,0
1,10	75,0	75,0	72,9
1,50	77,2	77,2	75,2
2,20	79,7	79,7	77,7
3,00	81,5	81,5	79,7
4,00	83,1	83,1	81,4
5,50	84,7	84,7	83,1
7,50	86,0	86,0	84,7
11,00	87,6	87,6	86,4
15,00	88,7	88,7	87,7
18,50	89,3	89,3	88,6
22,00	89,9	89,9	89,2
30,00	90,7	90,7	90,2
37,00	91,2	91,2	90,8
45,00	91,7	91,7	91,4
55,00	92,1	92,1	91,9
75,00	92,7	92,7	92,6
90,00	93,0	93,0	92,9
110,00	93,3	93,3	93,3
132,00	93,5	93,5	93,5
160,00	93,8	93,8	93,8
200 a 375	94,0	94,0	94,0

⁶ Fuente: Norma IEC 60034-30, 2008, Tabla 3

Tabla 7. Límites nominales para Standard Efficiency (IE1) 60 Hz⁷

Potencia nominal en kW	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS
	Eficiencia nominal	Eficiencia nominal	Eficiencia nominal
0,75	77,0	78,0	73,0
1,10	78,5	79,0	75,0
1,50	81,0	81,5	77,0
2,20	81,5	83,0	78,5
3,70	84,5	85,0	83,5
5,50	86,0	87,0	85,0
7,50	87,5	87,5	86,0
11,00	87,5	88,5	89,0
15,00	88,5	89,5	89,5
18,50	89,5	90,5	90,2
22,00	89,5	91,0	91,0
30,00	90,2	91,7	91,7
37,00	91,5	92,4	91,7
45,00	91,7	93,0	91,7
55,00	92,4	93,0	92,1
75,00	93,0	93,2	93,0
90,00	93,0	93,2	93,0
110,00	93,0	93,5	94,1
150,00	94,1	94,5	94,1
185 a 375	94,1	94,5	94,1

⁷ Fuente: Norma IEC 60034-30, 2008, Tabla 4

Tabla 8. Límites nominales para High Efficiency (IE2) 50 Hz⁸

Potencia nominal en kW	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS
	Eficiencia nominal	Eficiencia nominal	Eficiencia nominal
0,75	77,4	79,6	75,9
1,10	79,6	81,4	78,1
1,50	81,3	82,8	79,8
2,20	83,2	84,3	81,8
3,00	84,6	85,5	83,3
4,00	85,8	86,6	84,6
5,50	87,0	87,7	86,0
7,50	88,1	88,7	87,2
11,00	89,4	89,8	88,7
15,00	90,3	90,6	89,7
18,50	90,9	91,2	90,4
22,00	91,3	91,6	90,9
30,00	92,0	92,3	91,7
37,00	92,5	92,7	92,2
45,00	92,9	93,1	92,7
55,00	93,2	93,5	93,1
75,00	93,8	94,0	93,7
90,00	94,1	94,2	94,0
110,00	94,3	94,5	94,3
132,00	94,6	94,7	94,6
160,00	94,8	94,9	94,8
200 a 375	95,0	95,1	95,0

⁸ Fuente: Norma IEC 60034-30, 2008, Tabla 5

Tabla 9. Límites nominales para High Efficiency (IE2) 60 Hz⁹

Potencia nominal en kW	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS
	Eficiencia nominal	Eficiencia nominal	Eficiencia nominal
0,75	75,5	82,5	80,0
1,10	82,5	84,0	85,5
1,50	84,0	84,0	86,5
2,20	85,5	87,5	87,5
3,70	87,5	87,5	87,5
5,50	88,5	89,5	89,5
7,50	89,5	89,5	89,5
11,00	90,2	91,0	90,2
15,00	90,2	91,0	90,2
18,50	91,0	92,4	91,7
22,00	91,0	92,4	91,7
30,00	91,7	93,0	93,0
37,00	92,4	93,0	93,0
45,00	93,0	93,6	93,6
55,00	93,0	94,1	93,6
75,00	93,6	94,5	94,1
90,00	94,5	94,5	94,1
110,00	94,5	95,0	95,0
150,00	95,0	95,0	95,0
185 a 375	95,4	95,4	95,0

⁹ Fuente: Norma IEC 60034-30, 2008, Tabla 6

Tabla 10. Límites nominales para Premium Efficiency (IE3) 50 Hz¹⁰

Potencia nominal en kW	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS
	Eficiencia nominal	Eficiencia nominal	Eficiencia nominal
0,75	80,7	82,5	78,9
1,10	82,7	84,1	81,0
1,50	84,2	85,3	82,5
2,20	85,9	86,7	84,3
3,00	87,1	87,7	85,6
4,00	88,1	88,6	86,8
5,50	89,2	89,6	88,0
7,50	90,1	90,4	89,1
11,00	91,2	91,4	90,3
15,00	91,9	92,1	91,2
18,50	92,4	92,6	91,7
22,00	92,7	93,0	92,2
30,00	93,3	93,6	92,9
37,00	93,7	93,9	93,3
45,00	94,0	94,2	93,7
55,00	94,3	94,6	94,1
75,00	94,7	95,0	94,6
90,00	95,0	95,2	94,9
110,00	95,2	95,4	95,1
132,00	95,4	95,6	95,4
160,00	95,6	95,8	95,6
200 a 375	95,8	96,0	95,8

¹⁰ Fuente: Norma IEC 60034-30, 2008, Tabla 7

Tabla 11. Límites nominales para Premium Efficiency (IE3) 60 Hz¹¹

Potencia nominal en kW	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS
	Eficiencia nominal	Eficiencia nominal	Eficiencia nominal
0,75	77,0	85,5	82,5
1,10	84,0	86,5	87,5
1,50	85,5	86,5	88,5
2,20	86,5	89,5	89,5
3,70	88,5	89,5	89,5
5,50	89,5	91,7	91,0
7,50	90,2	91,7	91,0
11,00	91,0	92,4	91,7
15,00	91,0	93,0	91,7
18,50	91,7	93,6	93,0
22,00	91,7	93,6	93,0
30,00	92,4	94,1	94,1
37,00	93,0	94,5	94,1
45,00	93,6	95,0	94,5
55,00	93,6	95,4	94,5
75,00	94,1	95,4	95,0
90,00	95,0	95,4	95,0
110,00	95,0	95,8	95,8
150,00	95,4	96,2	95,8
185 a 375	95,8	96,2	95,8

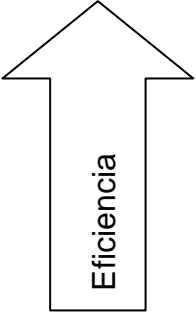
1.3.3 Comparación entre las clasificaciones NEMA e IEC

Un primer aspecto a considerar en esta comparación es que en la norma IEC se establecen valores límites de eficiencia para motores de 50 y 60 Hz en forma separada. Inclusive, esta norma presenta una sustentación técnica teórica de las razones para la diferencia de valores entre las dos frecuencias. En la norma NEMA solamente se considera la clasificación para los motores de 60 Hz.

Analizando los valores que determinan las diferentes categorías, se encuentra que hay equivalencia entre las categorías para 60 Hz, en la forma que se ilustra en la Tabla 12 (en el caso de NEMA tomando los valores para motores cerrados):

¹¹ Fuente: Norma IEC 60034-30, 2008, Tabla 8

Tabla 12. Comparación categorías de eficiencia NEMA / IEC

	Categorías NEMA	Categorías IEC	
	Premium	IE4	Super Premium
		IE3	Premium
	Energy Efficient	IE2	High
	Standard	IE1	Standard
IE0		Low efficiency	

En esta tabla se ha incluido una categoría IE0 que no está explícitamente en la norma IEC 60034-30, pero que al fijar unos valores mínimos para la categoría de los motores estándar, define una zona de valores de eficiencia donde en la práctica pueden estar ubicados algunos motores. Como esta zona correspondería a los motores por debajo de cualquier mínimo aceptable, se han denominado aquí como “low efficiency” solamente para efectos de comparación.

Se concluye entonces que los motores de las categorías IE0 e IE1 de IEC corresponden a la categoría de motores “standard” de NEMA; que los motores IE2 de IEC y “Energy Efficient” de NEMA son exactamente equivalentes; y que los motores IE3 e IE4 de IEC corresponden a la categoría “Premium” de NEMA. Dado que actualmente no se han establecido valores mínimos para la categoría IE4 de IEC, se tiene entonces que por el momento las dos categorías definidas en las dos normas como “Premium” son exactamente iguales-

1.4 Métodos para determinación de la eficiencia

Una vez establecidas las categorías de clasificación de los motores según su eficiencia, el siguiente aspecto a considerar es cómo determinar en forma precisa y confiable la eficiencia de un motor. Este tema ha sido objeto de estudio en distintas partes del mundo y desde hace mucho tiempo; y las experiencias y adelantos al respecto ha sido recogido en normas técnicas que tratan este asunto en particular.

Las normas más recientes en este campo son la norma IEC 60034-2-1, publicada en Septiembre de 2007 como actualización de la IEC 34-2 vigente desde 1972, y la IEEE 112, cuya versión más reciente es la de 2004.

A continuación se presentan aspectos determinantes relacionados con los métodos planteados en estas normas:

1.4.1 Determinación de la eficiencia según IEC 60034-2-1

Esta norma denominada *Rotating electrical machines - Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*, es aplicable a máquinas DC, sincrónicas y asincrónicas; sin embargo, dado el propósito de este trabajo, el análisis se centra en lo referente a motores de inducción.

1.4.1.1 Métodos para la determinación de la eficiencia

La norma establece dos grupos de métodos para la determinación de la eficiencia: métodos directos y métodos indirectos. Los primeros se refieren a aquellos en los que se mide directamente tanto la potencia de salida como la de entrada y con la relación de estos valores se calcula la eficiencia. Hacen parte de este grupo de

métodos la prueba del torquímetro, la prueba del dinamómetro y la prueba espalda-espalda con alimentación dual.

Los métodos de determinación indirecta de la eficiencia considerados en esta norma se basan en la medición de la potencia eléctrica de entrada y el cálculo separado de cada uno de los componentes de pérdidas del motor; posteriormente, el valor de la sumatoria de pérdidas se resta de la potencia de entrada para obtener la potencia de salida y así calcular la eficiencia.

Los distintos métodos para la determinación de la eficiencia están basados en una serie de suposiciones técnicas, cálculos y correcciones elaboradas a partir de los datos tomados durante los ensayos. Por tanto los resultados obtenidos por los distintos métodos pueden no ser iguales; sin embargo, la norma da entonces lineamientos para seleccionar el método que debe usarse en cada caso, tomando como criterio de preferencia el grado de certidumbre de los mismos, como se explica en el numeral siguiente. Con estas premisas, por ejemplo, indica que para motores trifásicos entre 1 y 150 kW el método preferente debe ser el de sumatoria de pérdidas con determinación de pérdidas adicionales en carga a través del método de pérdidas residuales.

1.4.1.2 Pérdidas en el motor de inducción

Las pérdidas totales de un motor de inducción P_T se pueden separar en tres grupos: pérdidas constantes P_k (de magnitud constante e independientes de la condición de carga), pérdidas en carga P_L (de magnitud variable y obviamente dependientes de la condición de carga) y las pérdidas adicionales en carga P_{LL} , de manera que se cumple la igualdad

$$P_T = P_k + P_L + P_{LL} \quad (3)$$

Las pérdidas constantes corresponden a la suma de las pérdidas en el hierro P_{fe} y las pérdidas por fricción y ventilación P_{fw} ; es decir,

$$P_k = P_{fe} + P_{fw} \quad (4)$$

Las pérdidas en carga son la suma de las pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator y del rotor, más las pérdidas en el sistema de escobillas P_b en el caso que aplique (motores con rotor devanado). De esta manera:

$$P_L = I^2R_1 + I^2R_2 + P_b \quad (5)$$

Las pérdidas adicionales en carga P_{LL} corresponden a las pérdidas debidas a los efectos producidos por las corrientes de carga en los núcleos y en las demás partes metálicas (exceptuando los conductores); y las pérdidas por corrientes de Eddy en los conductores de los devanados debidas a las pulsaciones del flujo originadas por la corriente de carga.

1.4.1.3 Incertidumbre

La incertidumbre se refiere, en este caso, a la inseguridad acerca del valor verdadero de la eficiencia calculada, la cual está determinada por la variación en los procedimientos de ensayo y por los equipos utilizados para las mediciones durante la prueba.

En la norma no se establecen requisitos numéricos de la incertidumbre, sino que se definen unos términos relativos así:

- *Baja*. Cuando el cálculo de la eficiencia se hace con base únicamente en datos obtenidos como resultado de pruebas.
- *Media*. Cuando la eficiencia se determina usando datos limitados con criterios de aproximación.
- *Alta*. Cuando la eficiencia se determina incorporando suposiciones en los datos ó en los procedimientos de cálculo.

1.4.1.4 Selección del método de prueba

No es fácil establecer reglas específicas para seleccionar, en cada caso, un método de prueba para determinar la eficiencia de un motor determinado. En el proceso de decisión intervienen factores como la información ó datos necesarios, la precisión requerida, el tipo, el tamaño y otras características del motor a probar, el equipo de prueba y los aparatos de medición disponibles.

La norma establece unos métodos preferidos para las distintas configuraciones, que a continuación se resumen en la Tabla 13. Finalmente, el método de prueba se selecciona a partir de los procedimientos que involucren menor incertidumbre.

Tabla 13. Criterios para selección del método para determinación de la eficiencia¹²

Método	Método preferido	Requerimientos de prueba	Incertidumbre
Directo			
Medición de torque	Todos los motores monofásicos y trifásicos menores a 1 kW	Torquímetro/dinamómetro para plena carga	Baja
Prueba con máquina calibrada		Máquina calibrada	Debe ser determinada
Prueba espalda-espalda con alimentación dual		Grupo de máquina para alimentación dual Dos máquinas idénticas	Baja
Pérdidas totales			
Método calorimétrico		Encerramiento térmico especial	Debe ser determinada
Prueba espalda-espalda con alimentación simple		Dos máquinas idénticas (rotor bobinado)	Baja
Sumatoria de pérdidas, con y sin prueba de carga			
Pérdidas adicionales en carga determinadas por el método de pérdidas residuales	Trifásicos mayores a 1 kW y hasta 150 kW	Torquímetro/dinamómetro para valores mayores a 1,25 veces plena carga	Baja
Pérdidas adicionales en carga determinadas por el método de valor asignado			Media a alta
Pérdidas adicionales en carga determinadas por el método de rotor removido y rotación inversa		Motor auxiliar con potencia nominal menor a 5 veces las pérdidas totales	Alta
Pérdidas adicionales en carga determinadas por el método Eh-star	Motores entre 1 y 150 kW. Para potencias mayores está bajo consideración	Resistor para 150% de la corriente nominal de fase	Media
Sumatoria de pérdidas, sin prueba de carga			
Corrientes, potencias y deslizamientos a partir del método del circuito equivalente. Pérdidas adicionales en carga determinadas por el método de valor asignado		En caso que no se disponga de equipos de prueba	Media a alta

1.4.1.5 Procedimiento para la determinación de la eficiencia en motores de inducción

De acuerdo a la Tabla 13, la medición directa de la eficiencia es recomendable únicamente en motores monofásicos y en trifásicos muy pequeños. Por tanto es de mayor interés analizar el método de medición indirecto.

El método de medición indirecta de la eficiencia, como se indicó anteriormente en este documento, se basa en la determinación, mediante una serie de ensayos, cálculos y correcciones, de los valores de cada una de las componentes de

¹² Fuente: Norma IEC 60034-2-1, 2008, Tabla 2

pérdidas, y con base en los resultados, obtener finalmente el valor de la eficiencia mediante la expresión

$$\eta = (P_1 - P_T) / P_1 \quad (6)$$

Donde

P_1 = Potencia de entrada ó absorbida por el motor

P_T = Pérdidas totales ocurridas en el motor tal como fue definido en 1.4.1.2.

Las componentes de pérdidas incluidas en la determinación de la eficiencia se agrupan de la siguiente manera:

Pérdidas constantes. El valor de estas pérdidas se obtiene a partir de un ensayo en vacío. De las pérdidas totales medidas en este ensayo se restan las pérdidas ocasionadas por la circulación de corriente sin carga por el devanado del estator, así

$$P_k = P_0 - P_s \quad (7)$$

$$P_s = 1,5 * I_0^2 * R_{LL0} \quad (8)$$

Donde

P_k = Valor de las pérdidas constantes

P_0 = Valor de las pérdidas totales medidas en el ensayo en vacío

P_s = Valor de las pérdidas en el devanado de estator debidas a las corrientes que circulan por él durante el ensayo sin carga

I_0 = Es la corriente absorbida por cada línea del motor durante el ensayo sin carga

R_{LL0} = Es la resistencia medida entre dos terminales del devanado trifásico del estator

Este ensayo sin carga se realiza para diferentes valores de tensión de alimentación del motor y para cada uno de ellos se calcula el valor de las pérdidas constantes. Teniendo en cuenta que las pérdidas constantes son el resultado de la suma entre de las pérdidas por fricción y ventilación, y las pérdidas en el hierro, se pueden separar los valores correspondientes a cada una de estas dos componentes de pérdidas como se explica a continuación.

Pérdidas por fricción y ventilación. Con los datos de los resultados de las pérdidas en vacío para diferentes valores de tensión de alimentación obtenidos en el ensayo de vacío, se dibuja una gráfica con los valores de pérdidas constantes P_k en función de los valores de voltaje de alimentación en vacío al cuadrado U_0^2 . En la elaboración de esta gráfica se descartan los puntos que muestran una desviación muy notoria. El resultado, que es una línea recta, se extrapola hasta encontrar el punto de corte con el eje de las pérdidas. El valor leído en este punto corresponde a las pérdidas por fricción y ventilación P_{fw} .

Pérdidas en el hierro. A partir de los valores P_k y P_{fw} determinados como se describió en el párrafo anterior, se calcula, para cada valor de tensión de alimentación, la magnitud de las pérdidas en el hierro haciendo $P_{fe} = P_k - P_{fw}$. Con estos valores se dibuja una gráfica de P_{fe} en función de la tensión de alimentación U_0 . Esta gráfica debe quedar definida para valores de tensión de alimentación entre el 60% y el 125% de la tensión nominal.

En esta gráfica se puede leer el valor de pérdidas en el hierro para un determinado valor de tensión. Ahora bien, debe tenerse en cuenta que esta curva ha sido obtenida a partir de ensayos en vacío, y por tanto para determinar el valor de las pérdidas en el hierro en funcionamiento con carga, el valor que debe usarse como

entrada para leer en la gráfica no puede ser el valor de la tensión en carga sino que dicho valor debe ser corregido teniendo en cuenta la caída de tensión que se presenta en el estator causada por la corriente de carga. En consecuencia, si el motor funciona en carga con tensión de alimentación U, el valor corregido con el que se debe leer en la gráfica es U_r y está dado por:

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \cos \varphi \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \sin \varphi \right)^2} \quad (9)$$

Donde:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \times U \times I}; \quad \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \quad (10)$$

U, I, P_1 y R son valores obtenidos de los resultados del ensayo en carga.

Pérdidas en carga. Como ya se mencionó, son las que se presentan en el estator y rotor debidas al efecto Joule, y se determinan a partir de los valores medidos en una prueba con carga y las posteriores correcciones necesarias de acuerdo con las condiciones de temperatura ambiente y temperatura de los devanados durante la prueba.

Pérdidas en el devanado del estator. Para una condición de carga dada, las pérdidas en los devanados del estator están dadas por la expresión

$$P_s = 1,5 * I^2 * R \quad (11)$$

Donde

I Valor de la corriente de alimentación en la prueba de carga

R Valor de la resistencia entre terminales del devanado del estator medida con los conductores a la temperatura que tenían durante la prueba.

Las pérdidas así obtenidas son luego corregidas usando la resistencia obtenida en la prueba de temperatura a carga nominal R_N y refiriéndola a temperatura ambiente de 25 °C. Esto es:

$$P_{se} = P_s * (234,5 + \theta_w - \theta_c + 25) / (234,5 + \theta_w) \quad (12)$$

Donde

P_{se} Valor de pérdidas en el cobre del estator corregidas

P_s Valor de las pérdidas en el cobre del estator en las condiciones de corriente y temperatura registradas durante el ensayo de carga

θ_w Valor de temperatura del devanado registrada durante la prueba de carga

θ_c Temperatura del medio refrigerante (ambiente) durante la prueba.

Pérdidas en el devanado del rotor. El valor de pérdidas en el devanado del rotor para cualquier condición de carga se determina con base en la expresión:

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) * s \quad (13)$$

Donde

s Valor del deslizamiento

Posteriormente se corrigen por temperatura las componentes de pérdidas del estator P_s y el deslizamiento. Este último se corrige con la misma expresión dada arriba para la corrección de las pérdidas del estator. Finalmente entonces la expresión para las pérdidas del rotor corregidas queda:

$$P_{r\theta} = (P_1 - P_{s\theta} - P_{fe}) * s_{\theta} \quad (14)$$

Donde

- $P_{r\theta}$ Valor de pérdidas del rotor corregidas
- P_1 Valor de la potencia eléctrica de entrada en cada condición de carga
- $P_{s\theta}$ Valor de pérdidas en el devanado del estator corregidas como se indicó arriba
- P_{fe} Valor de pérdidas en el hierro para la condición de carga
- s_{θ} Valor del deslizamiento corregido a la temperatura ambiente de referencia (25 °C)

Pérdidas adicionales. Para la determinación de estas pérdidas, la norma establece cuatro métodos de determinación. El primero es el método de cálculo de pérdidas residuales, el segundo está basado en pruebas de rotor removido y rotación inversa. En el tercero el valor de las pérdidas es un valor asignado y el último conocido como método Eh-Star necesita un ensayo adicional.

Puesto que las pérdidas adicionales son el tema central de esta tesis, más adelante se tratan con amplitud.

1.4.2 Determinación de la eficiencia según IEEE 112

Esta norma titulada *IEEE Standard Procedure for polyphase induction motors and Generators*¹³ es de gran reconocimiento en el mundo de los motores y ha servido de referencia desde hace varios años para la ejecución de las pruebas de eficiencia. La versión más reciente es la del año 2004 y es la edición que se toma como base para el análisis que se presenta a continuación.

1.4.2.1 Tipos de pérdidas

De acuerdo a esta norma las pérdidas en los motores eléctricos son:

- Pérdidas I^2R del estator
- Pérdidas I^2R del rotor
- Pérdidas por fricción y ventilación
- Pérdidas en el núcleo
- Pérdidas adicionales en carga
- Pérdidas por contacto en la escobillas

1.4.2.2 Métodos para la determinación de la eficiencia

Esta norma considera los siguientes métodos para la determinación de la eficiencia:

Método A. Medición directa de las potencias de entrada y salida

Método B. Mediciones de entrada y salida con segregación de pérdidas y medición indirecta de las pérdidas adicionales en carga

Método B1. Mediciones de entrada y salida con segregación de pérdidas y medición indirecta de las pérdidas adicionales en carga y una temperatura asumida.

¹³ ([3] Norma IEEE 112, 2004)

Método C. Máquinas duplicadas con segregación de pérdidas y medición indirecta de las pérdidas adicionales en carga.

Método E. Medición de la potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas y medición directa de las pérdidas adicionales en carga.

Método E1. Medición de la potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas y valor asumido de las pérdidas adicionales en carga.

Método F. Circuito equivalente con medición directa de las pérdidas adicionales en carga.

Método F1. Circuito equivalente con valor asumido de pérdidas adicionales en carga

Método C / F. Circuito equivalente con punto de carga calibrado por método C y medición indirecta de las pérdidas adicionales en carga.

Método E / F. Circuito equivalente con punto de carga calibrado por método E y medición directa de las pérdidas adicionales en carga.

Método E1 / F1. Circuito equivalente con punto de carga calibrado por método E y valor asumido para las pérdidas adicionales en carga.

1.4.2.3 Selección del método para la determinación de la eficiencia

El método A se utiliza solamente para motores con potencia menor a 1 kW. Los motores horizontales entre 1 y 300 kW deben probarse por el Método B.

Las máquinas verticales entre 1 y 300 kW deben probarse por el método B si los rodamientos lo permiten. En caso contrario, deben probarse con los métodos E, E1, F ó F1 pueden ser usados.

Las máquinas con potencias superiores a 300 kW deben probarse con los métodos B, B1, C, E, E1, f ó F1 dependiendo de la disponibilidad de los equipos y de las facilidades de prueba.

Cuando sea práctico, se pueden usar combinados los métodos C/F, E/F ó E1/F1 los cuales dan el nivel de confiabilidad de una prueba de carga y la ventaja de la simplicidad de solución del circuito para varias cargas.

1.4.2.4 Determinación de la eficiencia de acuerdo al método B.

Dado que la mayoría de los motores que se utilizan en la industria quedan cubiertos por el rango de potencias para el cual se exige la aplicación del método B, este es el de mayor interés y por tanto se describe a continuación.

De acuerdo con este método, inicialmente se calculan las pérdidas totales aparentes como la diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida, ambas medidas durante los ensayos. Luego se calculan separadamente los valores de las diferentes componentes de pérdidas (pérdidas en el cobre del estator, pérdidas en el cobre ó aluminio del rotor, pérdidas en el núcleo y pérdidas por fricción y ventilación). La diferencia entre el valor de las pérdidas aparentes y la suma de las pérdidas calculadas separadamente, representa las pérdidas adicionales en carga.

Se dibuja entonces una gráfica de pérdidas adicionales en carga en función del valor del torque el cuadrado, se hace un análisis de regresión y se determinan las pérdidas adicionales como el valor de esta función para torque cero. Con este valor de pérdidas adicionales en carga se determinan, las pérdidas totales finales y se calcula la eficiencia.

La norma establece una secuencia definida de las pruebas que se deben ejecutar para la determinación de la eficiencia de un motor. Esto no significa que las pruebas tengan que realizarse una inmediatamente después de la otra, simplemente deben cumplir el orden de ejecución. Lo que sí es requisito y debe

cumplirse, es que para cada prueba individual, el motor debe tener una temperatura cercana a la temperatura establecida para dicha prueba.

Las pruebas en la que se basa el método de determinación de la eficiencia son las que se mencionan a continuación. Las pruebas no se describen en detalle, solamente se menciona en qué consiste cada una.

Medición de la resistencia en frío. Con la máquina a temperatura ambiente, se mide la resistencia de los devanados del estator.

Prueba de temperatura a carga nominal. Se le aplica carga nominal al motor haciendo la verificación mediante un dinamómetro y se establece la temperatura de estabilización de los devanados del estator en esta condición.

Prueba bajo carga. Se carga el motor con diferentes valores de potencia utilizando un freno y se registran los valores de las variables de funcionamiento (corriente, potencia de entrada, voltaje, velocidad, torque, etc) para cada una de las condiciones de carga. La prueba se realiza a una temperatura cercana a la determinada en el ensayo anterior.

Prueba sin carga. Se ejecuta una prueba sin carga variando la tensión de alimentación empezando con 125% de la tensión nominal y disminuyendo hasta que la corriente tienda a incrementar.

Con los resultados obtenidos en las pruebas anteriores se hacen los cálculos y correcciones indispensables para determinar la eficiencia. Estos cálculos se describen a continuación

Pérdidas por fricción y ventilación. Primero se calcula, para cada valor de tensión aplicada en la prueba sin carga, la diferencia entre la potencia de entrada

y el valor de las pérdidas en los devanados del estator. Después se construye una gráfica con estos valores en función del cuadrado de la tensión aplicada; se aplica un método de regresión a esta función y se extrapola; el valor de la función en U^2 igual a cero es el valor de las pérdidas por fricción y ventilación

Pérdidas en el núcleo. Se obtienen a partir de los resultados de la prueba sin carga, restando de la potencia de entrada las pérdidas en los devanados del estator (obviamente en vacío) y las pérdidas por fricción y ventilación.

Pérdidas I^2R del estator. Para este cálculo se usa el valor de la resistencia medida en frío y corregida para la temperatura registrada en el ensayo de calentamiento con carga nominal.

Pérdidas I^2R del rotor. Este valor se calcula con base en el deslizamiento real medido durante la prueba con carga y no requiere correcciones.

Pérdidas adicionales en carga. Al valor de pérdidas aparentes calculado inicialmente se le resta la suma de las pérdidas descritas en los cuatro títulos anteriores. Este valor se representa en una gráfica como función del torque al cuadrado, luego se hace una regresión y se extrapola la curva. El punto de corte de esta gráfica con el eje de potencia es el valor de las pérdidas adicionales en carga.

1.5 Comparación de las metodologías IEC e IEEE

Con la publicación de la nueva versión de la norma IEC 60034-2, es decir, la designada como IEC 60034-2-1 y publicada en 2007, los requerimientos para las pruebas y los procedimientos definidos para la determinación de la eficiencia se

han acercado bastante a los descritos en el *Standard Procedure for polyphase induction motors and Generators* de IEEE 112

Pese a lo anterior, si se hace un análisis detallado de las dos normas, se encuentran algunas diferencias que, al final, se traducen en que se obtienen distintos valores de eficiencia al efectuar los cálculos con base en cada una de ellas.

A continuación se presenta un resumen de las diferencias más notables.

1.5.1 Requerimientos generales

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<p><u>Fuente de alimentación</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • El factor de distorsión de armónicos de tensión, THD, no debe exceder 0,05. • El desbalance de tensiones en el sistema trifásico no debe exceder 0,5%. • La frecuencia no debe desviarse más de $\pm 0,1\%$ de la frecuencia nominal. Si se presentan variaciones de frecuencia durante las pruebas, estas no deben exceder 0,33% de la frecuencia promedio. 	<p><u>Fuente de alimentación</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • El factor de armónicos de voltaje, HVF, no debe exceder 0,03. • El desbalance de voltaje del sistema trifásico debe ser tal que la componente de secuencia negativa no exceda en 1,5% la componente de secuencia positiva por un período de tiempo largo , ó 1,5% durante un periodo corto de unos pocos minutos; y una componente de secuencia cero que no exceda 1% la componente de secuencia positiva. • La frecuencia no debe desviarse

<p><u>Temperaturas estandarizadas</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • La temperatura ambiente de referencia para presentar todos los resultados es de 25 °C. • Se define una temperatura de los devanados como “temperatura especificada” a la cual se deben referir todos los cálculos de las componentes de pérdidas que dependen de los valores de resistencia (I^2R). <p><u>Mediciones</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Los instrumentos de medición de variables eléctricas deben estar calibrados con certificación no mayor a doce meses en la fecha de prueba y sus límites de error no deben ser mayores al 0,2% del máximo de la escala • Los errores de los transformadores de potencial y de corriente no deben ser mayores de 0,3%. • Las pérdidas mecánicas del freno 	<p>más de $\pm 0,3\%$ de la frecuencia nominal.</p> <p><u>Temperaturas estandarizadas</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • La temperatura ambiente de referencia es 25 °C. • Aunque no define una temperatura con el nombre de “temperatura especificada”, si se establece el método de ensayo para obtener la temperatura de estabilización con carga nominal. Sin embargo aquí hay una gran diferencia, pues esta norma no establece la corrección por altura sobre el nivel del mar. <p><u>Mediciones</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • La exigencia en cuanto a los límites de error de los instrumentos de medición de variables eléctricas, es igual que en la norma IEEE. • Para los transformadores de los instrumentos de medición, la exigencia del límite de error es igual al especificado por IEEE. • Los instrumentos de medición del torque deben tener una precisión de
--	--

<p>que se use para las pruebas no debe ser mayor del 15% de la potencia nominal del motor que se va a probar, y debe ser sensible a variaciones de torque del 0,25% del torque nominal.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los instrumentos de medición de la velocidad de rotación no deben tener un error de lectura mayor a +-1,0 rpm de la lectura. • No establece explícitamente una precisión para los instrumentos de medición de temperatura. 	<p>+0,2% de máximo de la escala.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La medición de la velocidad requiere un precisión de 1% ó de 1,0 rpm, el que represente menor error. • La medición de temperatura exige instrumentos que tengan una precisión de +-1,0 °C
---	---

1.5.2 Secuencia de las pruebas

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<p>Se establece un orden específico para la ejecución de las pruebas que conforman el método. El orden de las pruebas requeridas es:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Medición de la resistencia de devanados del estator en frio • Prueba de calentamiento con carga 	<p>Aunque las pruebas son las mismas, e igualmente se indica una secuencia de pruebas, esta es diferente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prueba sin carga (ó de vacío) • Prueba de calentamiento con carga nominal • Prueba de determinación de curva

<p>nominal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prueba bajo carga • Prueba sin carga (ó de vacío) 	<p>de carga</p> <p>Hay ambigüedad respecto al orden de ejecución de las pruebas; por ejemplo en el numeral 6.4.2.2, Nota 2, la norma ofrece la opción de realizar la prueba de vacío después de la de carga.</p> <p>En cuanto a la medición de la resistencia, de los devanados del estator no se indica nada expresamente con respecto a qué posición ocupa esta prueba dentro de la secuencia de pruebas.</p>
---	---

1.5.3 Medición de resistencia de devanados en frío

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<p>Se mide la resistencia de los devanados a temperatura ambiente y se registran los valores de resistencia y de temperatura ambiente.</p>	<p>Explícitamente no establece la medición en frío. Solamente hace referencia a la medición de la resistencia al final de la prueba de calentamiento.</p> <p>Establece que la resistencia se debe referir a una temperatura estándar del medio ambiente de 25 °C.</p>

1.5.4 Prueba de calentamiento con carga nominal

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<p>Se realiza la prueba cargando el motor bajo condiciones nominales, usando para ello un freno de potencia. Con base en este ensayo se determina la “temperatura especificada” de la máquina. Esta es la temperatura a la cual se debe calcular los valores de eficiencia para todas las condiciones de carga.</p> <p>La temperatura especificada se determina por el incremento de temperatura durante esta prueba, más 25 °C.</p> <p>La temperatura especificada se corrige igualmente por diferencia de altura sobre el nivel del mar entre el sitio de prueba y 1.000 msnm que es la altura de referencia.</p>	<p>Con respecto a esta prueba hay diferencia básica: Esta norma no tiene en cuenta corrección por altura sobre el nivel del mar.</p>

1.5.5 Prueba bajo carga

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<p>El motor se carga con potencia variable y se mide el valor con la ayuda de un dinamómetro. La temperatura del</p>	<p>La temperatura del devanado debe estar dentro de un rango de +- 5 °C alrededor de la temperatura más alta</p>

<p>devanado debe estar dentro un rango de ± 10 °C alrededor de la temperatura más alta registrada durante la prueba de calentamiento con carga nominal. Cuando sea necesario se hace una prueba de corrección de dinamómetro.</p> <p>Se toman medidas en seis condiciones de carga comenzando en 150% y terminando en 25% de la carga nominal.</p>	<p>registrada durante la prueba de calentamiento con carga nominal.</p> <p>Se toman medidas en seis condiciones de carga comenzando en 150% y terminando en 25% del valor nominal. Se mide resistencia antes de la mayor de las condiciones de carga y después de la menor. Para las condiciones de carga por encima del 100% de la nominal se usa la resistencia medida antes de la mayor carga y para las condiciones de carga inferiores a 100% de la nominal se toma una variación lineal del valor de la resistencia en función de la carga entre los dos valores de resistencia medidos. Sin embargo se da la posibilidad de tomar las medidas de temperatura por medio de un detector embebido en el bobinado.</p>
---	---

1.5.6 Prueba sin carga

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<p>Se realiza la prueba comenzando con 125% de la tensión nominal y disminuyendo su valor hasta que una disminución adicional de la tensión</p>	<p>No hay diferencias esenciales con respecto a la norma IEEE 112.</p> <p>Lo único adicional que menciona es la</p>

<p>produzca un incremento en la corriente.</p> <p>Si inmediatamente antes de esta prueba se ha realizado la prueba de calentamiento, no es necesaria una estabilización de las pérdidas en los rodamientos. En caso contrario el motor se deja rodando sin carga hasta que se estabilice el valor de la potencia de entrada (que las lecturas no varíen más de 3% entre dos mediciones hechas con intervalos de 30 minutos)</p>	<p>cantidad de condiciones de carga que deben medirse indicando, además, que la tensión aplicada durante la prueba debe llegar aproximadamente hasta el 20% de la tensión nominal.</p>
---	--

1.5.7 Cálculo de las pérdidas de fricción y ventilación

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<p>El valor se determina a partir de la prueba sin carga. Para cada valor de tensión aplicada se hace la resta entre la potencia de vacío y las pérdidas en el cobre del estator I^2R (a temperatura de prueba); se dibuja una gráfica con estos valores en función de la tensión al cuadrado (deben utilizarse los 3 puntos de menor valor). Si se extrapola esta curva hasta tensión cero, el punto de corte con el eje de potencia corresponde al valor de las pérdidas de</p>	<p>No hay diferencia</p>

fricción y ventilación.	
-------------------------	--

1.5.8 Cálculo de pérdidas en el núcleo

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
Se determinan, para cada valor de la tensión de alimentación, a partir de la prueba sin carga, restando de la potencia de entrada, las pérdidas en los devanados del estator I^2R (a temperatura de prueba) y las pérdidas por fricción y ventilación determinadas en el punto anterior.	<p>Especifica que deben determinarse valores de pérdidas en el núcleo para voltajes entre el 60% y el 125% del nominal.</p> <p>La norma IEEE 112 no precisa nada al respecto.</p> <p>Sin embargo hay una diferencia notoria: la norma IEC, recomienda que las caídas de tensión en la resistencia del devanado de estator se calculen con los valores de resistencia obtenidos en la prueba de carga; con los valores de voltaje así obtenidos (U_r), se leen los valores de pérdidas del hierro en la curva de la característica de vacío.</p>

1.5.9 Cálculo de pérdidas I^2R en el estator

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
La resistencia R con la cual se calculan estas pérdidas, se obtiene con la	Se calcula inicialmente un valor no corregido de pérdidas para cada

<p>ecuación de variación de la resistencia en función de la temperatura,</p> $R/R_{TR} = (t_A + k) / (t_{TR} + k)$ <p>Donde</p> <p>R_{TR} y t_{TR} son los valores de la resistencia y la temperatura al momento del corte en la prueba de calentamiento con carga nominal,</p> <p>t_A es el valor de temperatura para cada condición en la prueba de carga y se calcula así:</p> $t_A = (t_{TR} / t_{TTD}) * t_t$ <p>Donde</p> <p>t_{TTD} es la temperatura al momento del corte en la prueba de calentamiento con carga nominal, medida con un detector embebido,</p> <p>t_t es la temperatura medida en cada condición de la prueba de carga.</p>	<p>condición de carga:</p> $P = 1,5 * I^2R$ <p>Donde</p> <p>R es la resistencia medida en la prueba de calentamiento con carga nominal.</p> <p>Posteriormente este valor de pérdidas se corrige a la temperatura de referencia (25 °C).</p>
---	---

1.5.10 Cálculo de pérdidas I^2R en el rotor

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
Este valor se calcula mediante la	No hay diferencia. el cálculo se hace de

<p>expresión</p> $P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) * s$ <p>Donde</p> <p>P_1 es la potencia de entrada</p> <p>P_s es el valor de las pérdidas I^2R en el estator</p> <p>P_{fe} es el valor de las pérdidas en el núcleo</p> <p>s es el deslizamiento</p> <p>En este cálculo las pérdidas en el devanado del estator son las calculadas a temperatura de prueba-</p>	<p>la misma manera</p>
---	------------------------

1.5.11 Cálculo de las pérdidas totales aparentes

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<p>Para cada punto de carga se calcula como la diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida, ambas medidas directamente en la prueba de carga.</p>	<p>No tiene explícito este concepto</p>

1.5.12 Determinación de las pérdidas adicionales en carga

EEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<p>Para cada condición de operación con carga se hace la suma de las pérdidas I^2R del estator a la temperatura de prueba, las pérdidas en el núcleo, las pérdidas por fricción y ventilación y las pérdidas I^2R del rotor al valor medido de deslizamiento; el resultado de esta suma se resta de las pérdidas totales aparentes para obtener el valor de las pérdidas adicionales en carga.</p>	<p>No hay diferencia</p>

1.5.13 Homogenización de las pérdidas adicionales en carga

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<p>Se hace una homogenización de las pérdidas adicionales en carga mediante la aplicación de una regresión lineal, basada en la expresión de las pérdidas adicionales como función del cuadrado del torque</p>	<p>En el procedimiento es similar. La única diferencia está en el criterio del factor de correlación para dar por satisfactoria la prueba. Mientras que la norma IEEE define este valor del factor de correlación en 0,9, la norma IEC lo fija en 0,95.</p>

1.5.14 Corrección de las pérdidas adicionales en carga

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
---------------------	---------------

<p>La corrección consiste en trasladar la gráfica de la función encontrada anteriormente, conservando la pendiente y haciendo que pase por el origen. De esta manera queda la gráfica de pérdidas adicionales en carga en función del torque al cuadrado.</p>	<p>No hay diferencia en este aspecto.</p>
---	---

1.5.15 Corrección por temperatura de las pérdidas I²R del estator

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<p>Las pérdidas I²R del estator se calculan con la resistencia de los devanados corregida a la temperatura especificada (que es la que se determina con la prueba de calentamiento con carga nominal)</p>	<p>Para la corrección de los valores de resistencia se toma como referencia , la temperatura del medio ambiente como igual a 25 °C</p>

1.5.16 Corrección por temperatura de las pérdidas I²R del rotor

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<p>El valor de estas pérdidas se corrige con base en la ecuación</p> $P_{r\theta} = (P_1 - P_{s\theta} - P_{fe}) * s_{\theta}$	<p>No hay diferencia. Se calcula exactamente igual</p>

<p>$P_{r\theta}$ es el valor de corregido para la temperatura de la prueba en carga</p> <p>$P_{s\theta}$ es el valor de las pérdidas en el devanado del estator ya corregido</p> <p>P_{fe} es el valor de las pérdidas en el hierro a las condiciones de tensión de alimentación y temperatura registradas durante la prueba en carga.</p> <p>s_{θ} es el valor de deslizamiento corregido con la misma expresión utilizada para la corrección de la resistencia del devanado del estator.</p>	
---	--

1.5.17 Pérdidas totales corregidas

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
El valor corregido de estas pérdidas se calcula con base en la suma de los valores corregidos de las pérdidas de fricción y ventilación, las pérdidas en el núcleo, las pérdidas adicionales en	No hay diferencia

carga, las pérdidas I^2R del estator y las pérdidas I^2R del rotor,	
---	--

1.5.18 Cálculo de la eficiencia

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
Finalmente la eficiencia se calcula con base en la expresión $\text{Eff} = (\text{Potencia de entrada} - \text{Perdidas totales corregidas}) / (\text{Potencia de entrada})$	No hay diferencia

1.6 Comentarios acerca de la comparación entre las normas IEEE 112 e IEC 60034-2-1

Como resultados del análisis comparativo entre estas dos normas se pueden presentar las siguientes consideraciones importantes:

- a. La norma IEC 60034 -2 -1 no establece ninguna corrección del valor de la resistencia del devanado del estator como consecuencia de la variación de temperatura por efecto de la altura sobre el nivel del mar. Esta circunstancia crea dificultades pues así no son fácilmente comparables los resultados obtenidos en lugares de prueba que se encuentren a diferentes alturas sobre el nivel del mar
- b. Las exigencias de las condiciones de prueba relacionadas con las características de la señal de tensión y con las especificaciones de calidad

de los instrumentos de medida, son muy similares en las dos normas; aunque en algunos apartes, aparentemente cada una de ellas presenta dichas exigencias y especificaciones de maneras diferentes.

- c. En la norma IEC 60034 -2 -1 no hay precisión en cuanto a la secuencia en la que se deben ejecutar las diferentes pruebas lo cual puede crear confusión; sin embargo, se puede adoptar la misma secuencia establecida en la norma IEEE 112., caso en el cual pueden ser comparables los resultados obtenidos con la aplicación de las dos normas.
- d. En IEEE las pérdidas en el hierro se obtienen de la característica de vacío restando de la potencia de entrada, las pérdidas en la resistencia del devanado de estator y las pérdidas por fricción y ventilación. En IEC, se realiza el mismo cálculo en cada punto de la característica de vacío y se construye entonces una gráfica de pérdidas en el hierro contra el voltaje. Con los datos de la característica en carga, se calcula la caída de tensión en la resistencia del estator, y con el voltaje resultante U_r se leen las pérdidas en el hierro de la curva en vacío. Esto marca una diferencia notable al final en el cálculo de eficiencia.
- e. Otra causa que origina diferencias en los resultados de cálculos de eficiencia cuando estos cálculos se hacen de acuerdo con una o con la otra norma, es la forma como las dos normas evalúan la magnitud de las pérdidas en los devanados del estator. Aunque las dos normas utilizan como base el resultado de pruebas con carga, mientras la norma IEEE 112 introduce correcciones por variación de resistencia debida a la temperatura teniendo en cuenta el resultado de la prueba de calentamiento con carga nominal, la IEC 60034 -2 -1 utiliza el valor de resistencia obtenida en el ensayo con carga nominal y no incluye ninguna corrección.

1.7 Validación práctica de las diferencias de las normas

Analizadas estas diferencias desde el punto de vista teórico, y con el fin de llevar a cabo las pruebas que permitieran validar en forma práctica los resultados de los métodos tal como se propuso en los objetivos del presente trabajo, se consideró necesario como parte de la investigación, evaluar las condiciones prácticas de ensayo disponibles y ajustarlas con base en dicha evaluación para que los resultados tuvieran el grado de confiabilidad requerido. Con este propósito se estudiaron y definieron entonces todos los requerimientos de prueba, tanto en instrumentos de medición como en lo referente a montajes o disposiciones de prueba, procedimientos adecuados en el laboratorio, y cálculos de los distintos componentes de pérdidas.

Hechos los ajustes necesarios en cuanto a requerimientos de prueba, procedimientos e instrumentos de medición establecidos en el estudio en mención, se probaron motores de acuerdo a las dos metodologías. Esta validación se realizó con una buena parte de la serie de motores fabricados por SIEMENS MANUFACTURING S.A. en Colombia, llegando a establecer las diferencias tanto en los valores de eficiencia, como en los componentes de pérdidas.

En la Tabla 14 se puede observar el espectro de pruebas realizadas una vez adecuados los requerimientos de ensayo:

Tabla 14. Espectro de motores probados y evaluados con los métodos IEC e IEEE

Potencia (HP)	2 Polos	4 Polos	6 Polos
1	X	X	X
2	X	X	X
3	X	X	X
4	X	X	X
5	X	X	
7,5	X	X	X
10	X	X	
15		X	
20		X	
25		X	
30	X	X	
40		X	X
50			X
60	X		
75		X	X
100	X	X	

1.8 Comparación de los resultados prácticos de las dos normas

En las Tablas 15, 16 y 17 se resumen los resultados comparativos de las metodologías IEC e IEEE para los motores probados como parte de este trabajo. Se descartaron los resultados de algunos motores, pues se detectaron inconsistencias ó dudas razonables respecto a sus resultados. De todas maneras se observa que la muestra es significativa en cuanto a la cantidad de potencias y número de polos de los motores. Más aun, la distribución de la muestra refleja la situación real en cuanto al uso de los motores, es decir, los más usados son los de 4 polos, luego siguen los de 2 polos y por último están los de 6 polos.

Tabla 15. Resultados comparativos pérdidas y eficiencia motores 2 polos

Referencia	Nº Polos	Potencia [HP]	Perdidas [W]	IEC	IEEE	%
1LA7 080-2YA60	2	1	Ps	158,37	140,00	13,12
			Pr	74,46	78,19	4,77
			Pfw	53,27	56,16	5,15
			Pfe	41,05	54,18	24,22
			PLL	139,15	135,34	2,82
			Eficiencia	69,36	70,92	2,19
1LA7 096-2YA60	2	4	Ps	267,53	260,29	2,78
			Pr	168,71	165,45	1,97
			Pfw	84,87	85,51	0,75
			Pfe	77,65	89,79	13,52
			PLL	170,29	161,56	5,40
			Eficiencia	79,30	79,70	0,51
1LA7 112-2YA60	2	5	Ps	375,40	372,57	0,76
			Pr	164,47	156,61	5,02
			Pfw	146,40	143,38	2,10
			Pfe	96,12	106,09	9,40
			PLL	270,49	295,18	8,37
			Eficiencia	78,31	77,51	1,03
1LA7 114-2YA60	2	7,5	Ps	443,28	410,84	7,90
			Pr	229,57	220,39	4,16
			Pfw	160,69	97,34	65,08
			Pfe	172,78	280,61	38,43
			PLL	424,71	432,53	1,81
			Eficiencia	79,97	79,86	0,14
1LA7 130-2YA60	2	10	Ps	504,20	490,28	2,84
			Pr	238,87	224,72	6,29
			Pfw	261,98	256,39	2,18
			Pfe	131,05	163,43	19,81
			PLL	340,57	331,99	2,58
			Eficiencia	83,77	83,98	0,25
1LA5 183-2YA80	2	35	Ps	829,76	813	2,11
			Pr	437,22	438	0,25
			Pfw	390,06	390	0,00
			Pfe	319,88	402	20,37
			PLL	309,11	296	4,35
			Eficiencia	92,14	92,04	0,11
1LA5 207-2YA	2	60	Ps	910,43	899	1,23
			Pr	466,06	458	1,74
			Pfw	478,55	448	6,91
			Pfe	962,66	1085	11,29
			PLL	833,74	827	0,81
			Eficiencia	92,43	92,32	0,11

Tabla 16. Resultados comparativos pérdidas y eficiencia motores 4 polos

Referencia	Nº Polos	Potencia [HP]	Perdidas [W]	IEC	IEEE	%
1LA7 080-4YA60	4	1	Ps	111,41	106,01	5,10
			Pr	55,90	53,78	3,95
			Pfw	17,53	17,53	0,00
			Pfe	36,26	43,15	15,98
			PLL	40,39	40,93	1,32
			Eficiencia	73,88	73,67	0,28
1LA7 096-4YA61	4	3	Ps	272,90	256,12	6,55
			Pr	176,99	163,87	8,01
			Pfw	20,30	20,30	0,00
			Pfe	60,55	79,23	23,57
			PLL	102,97	99,39	3,61
			Eficiencia	77,93	78,49	0,70
1LA7 112-4YA60	4	5	Ps	346,45	335,71	3,20
			Pr	131,43	133,47	1,53
			Pfw	10,21	40,51	74,80
			Pfe	64,85	121,68	46,70
			PLL	185,59	151,36	22,62
			Eficiencia	83,99	83,00	1,19
1LA7 114-4YA61	4	7,5	Ps	456,04	436,50	4,48
			Pr	249,03	238,83	4,27
			Pfw	36,11	36,11	0,00
			Pfe	137,73	176,14	21,81
			PLL	274,47	267,57	2,58
			Eficiencia	83,38	83,37	0,01
1LA7 131-4 YA 70	4	10	Ps	397,52	373,74	6,36
			Pr	199,03	186,62	6,65
			Pfw	95,31	93,98	1,42
			Pfe	164,79	156,88	5,04
			PLL	114,46	105,69	8,30
			Eficiencia	88,26	88,74	0,54
1LA7 167-4YA70	4	25	Ps	722,84	687,86	5,08
			Pr	487,76	469,24	3,95
			Pfw	162,99	163,23	0,15
			Pfe	325,50	420,07	22,51
			PLL	278,22	269,91	3,08
			Eficiencia	90,55	90,43	0,13
1LA5183-4YA80	4	30	Ps	936,19	662,79	41,25
			Pr	426,16	349,18	22,05
			Pfw	99,38	62,20	59,78
			Pfe	333,61	405,11	17,65
			PLL	314,25	326,70	3,81
			Eficiencia	91,34	92,63	1,39
1LA5 223-4YA70	4	75	Ps	1524,50	1437	6,10
			Pr	975,25	944	3,26
			Pfw	169,00	169	0,00
			Pfe	1213,15	1366	11,19
			PLL	256,06	235	8,99
			Eficiencia	93,25	93,22	0,04

Tabla 17. Resultados comparativos pérdidas y eficiencia motores 6 polos

Referencia	Nº Polos	Potencia [HP]	Perdidas [W]	IEC	IEEE	%
1LA7 083-6YA60	6	1	Ps	149,34	143,61	3,99
			Pr	112,78	109,26	3,23
			Pfw	13,70	13,70	0,00
			Pfe	25,50	23,76	7,33
			PLL	32,64	27,94	16,83
			Eficiencia	69,16	70,53	1,94
1LA7 096-6YA62	6	2	Ps	342,04	334,20	2,34
			Pr	211,41	216,70	2,44
			Pfw	9,50	9,50	0,01
			Pfe	44,20	46,57	5,10
			PLL	73,89	44,81	64,91
			Eficiencia	69,07	70,40	1,89
1LA7 112-6YA60	6	3	Ps	377,20	370,23	1,88
			Pr	115,06	113,20	1,64
			Pfw	24,87	24,87	0,00
			Pfe	54,07	61,23	11,69
			PLL	138,74	135,36	2,49
			Eficiencia	75,93	76,33	0,52
1LA7 133-6YA70	6	7,5	Ps	521,69	480,20	8,64
			Pr	258,74	240,70	7,49
			Pfw	62,40	60,12	3,79
			Pfe	142,68	174,72	18,34
			PLL	194,08	190,94	1,65
			Eficiencia	82,68	83,09	0,50
1LA5 223-6YA80	6	50	Ps	1437,11	1381	4,05
			Pr	722,36	690	4,69
			Pfw	87,71	66	32,58
			Pfe	856,70	967	11,38
			PLL	679,33	660	2,85
			Eficiencia	90,88	91,02	0,16

Analizando los resultados de estos 20 motores se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- La determinación de la eficiencia de los motores establecida en la norma IEC 60034-2-1 emitida en 2007, obteniendo las pérdidas adicionales en carga por el método de las pérdidas residuales, se acerca bastante a la norma IEEE 112, método B, que existía de tiempo atrás (la edición más reciente es del 2004). En principio pareciera que en la norma IEC se hubiera adoptado la metodología IEEE, pero realmente en rigor hay

diferencias en el manejo de los datos. Las diferencias más grandes son del orden del 2% entre uno y otro método, y si se toman promedios por cada cantidad de polos, las diferencias en promedio son de 0,62% para 2 polos, 0,54% para 4 polos y 1,00% para 6 polos.

- Las diferencias en el manejo de los datos, algunas de las cuales se anotaron arriba en el numeral 1.6, conducen a resultados distintos en algunas componentes de pérdidas, aunque al final los resultados de la eficiencia son muy similares. Las diferencias más notorias se presentan en las componentes de pérdidas en el hierro y en las pérdidas por fricción y ventilación, como se puede observar en la tabla 18 que contiene los promedios de las desviaciones porcentuales de cada una de las componentes de pérdidas, como de la eficiencia final

Tabla 18. Comparación componentes de pérdidas

Componente	PROMEDIO DE LAS DESVIACIONES PORCENTUALES		
	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS
Ps	4,39	9,77	4,18
Pr	3,46	6,71	3,90
Pfw	11,74	17,02	7,28
Pfe	19,58	20,56	10,77
PLL	3,73	6,79	17,75
Eficiencia	0,62	0,54	1,00

- Las diferencias en los valores de pérdidas en el hierro entre las dos metodologías es explicable dado a que este es uno de los puntos donde es más notoria la diferencia en el manejo de los datos. Mientras en la norma IEEE se obtienen las pérdidas en el hierro fijas para un voltaje de alimentación independiente de la carga del motor, en la norma IEC se tiene en cuenta la caída de tensión en el devanado de estator y se obtienen un voltaje para cada condición de carga al cual se deben leer las pérdidas en la gráfica de pérdidas en función del voltaje.

- Las dos normas se han alineado en cuanto a los métodos preferidos de prueba y parecen dejar en segundo plano la discusión de los métodos alternativos de medición de pruebas adicionales. Esto debido a que dan como preferente el método de las pérdidas residuales, y se les atribuye a los demás una incertidumbre media o alta.
- Otro análisis interesante de observar es la participación porcentual de cada una de las componentes en las pérdidas totales. Con base en todos los datos medidos y realizando promedios, podemos ver en la tabla 19 la mencionada participación. Se puede observar que la mayor participación la tienen las pérdidas en el cobre del estator, seguidas de las pérdidas del rotor. También es de anotar que se observan tendencias crecientes o descendentes en las componentes, en función de la cantidad de polos. También se ratifica que las pérdidas adicionales en carga juegan un papel importante en la composición de las pérdidas totales, con lo cual cobra importancia el análisis que se desarrolla en el capítulo siguiente

Tabla 19. Componentes de pérdidas

Componente	PARTICIPACIÓN PORCENTUAL		
	2 POLOS	4 POLOS	6 POLOS
Ps	31%	39%	45%
Pr	16%	21%	25%
Pfw	13%	6%	3%
Pfe	16%	19%	13%
PLL	24%	15%	14%

CAPÍTULO 2: MÉTODOS PARA DETERMINAR LAS PÉRDIDAS ADICIONALES

2.1 Análisis conceptual

Las pérdidas adicionales en carga (stray load losses) en la forma más simple se pueden definir como aquellas pérdidas que resultan de restar a las pérdidas totales que ocurren en un motor a una determinada condición de carga, el conjunto de pérdidas más comunes y evidentes, es decir, las pérdidas en los devanados de estator y rotor, las pérdidas en el hierro y las pérdidas por fricción y ventilación, es decir:

$$P_{LL} = P_T - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fW} \quad (15)$$

P_{LL} = Pérdidas adicionales en carga

P_T = Pérdidas totales en el motor

P_s = Pérdidas en el estator debidas al efecto Joule

P_r = Pérdidas en el rotor debidas al efecto Joule

P_{fe} = Pérdidas en el hierro

P_{fW} = Pérdidas por fricción y ventilación

2.1.1 Origen de las pérdidas adicionales en carga

Estas pérdidas adicionales han sido objeto de análisis desde hace muchos años, pero dada la dificultad de su interpretación física y de su medición confiable, en un principio se creó un “acuerdo general” de despreciarlas.¹⁴

¹⁴ ([4] Nailen, 1997)

Posteriormente se iniciaron estudios más detallados y desde 1934 se postularon las primeras interpretaciones físicas de estas pérdidas, anotando como sus fuentes principales a:

- Pulsaciones de campo en la superficie ó en el extremo de los dientes
- Pulsación de flujo en el núcleo
- Pulsación de flujo de dispersión en las ranuras
- Pulsación del flujo de dispersión principal

Hoy día se han depurado las interpretaciones y se tienen como causas de las pérdidas adicionales a las siguientes:¹⁵

- Debido a que en general las ranuras de estator y rotor son abiertas (hay variaciones sobre esta premisa pues en muchos casos las ranuras del rotor son cerradas), se generan pulsaciones de campo debido a la diferencia de reluctancia que se presenta al quedar enfrentados o no los dientes de estator y rotor. Estas pulsaciones de campo generan pérdidas tanto en el estator como en el rotor, que no son contabilizadas en las pérdidas por histéresis y Foucault. Estas pérdidas son dependientes de la corriente, más que de la tensión.
- El flujo de dispersión, que causa pérdidas en los conductores y en otras partes de la estructura metálica del motor.
- Corrientes de fuga que se presentan entre las barras de la jaula de ardilla del rotor, particularmente en rotores con barras inclinadas, originadas por las tensiones inducidas en el núcleo del rotor, y facilitadas por la baja resistencia de contacto entre las barras y el núcleo.

¹⁵ ([5] M.Auolkadi)

2.1.2 Limitación de las pérdidas adicionales

Analizando las causas de las pérdidas adicionales se han intentado diferentes técnicas disponibles en la industria para tratar de limitar las pérdidas adicionales, en algunos casos sin mucho éxito.

Para disminuir las corrientes parásitas entre las barras, indicadas en el numeral anterior por ejemplo, se han intentado distintas técnicas para aislar del núcleo rotor, las barras de la jaula. Se han intentado infructuosamente recubrimientos de las barras, pues las temperaturas que deben soportar durante la inyección de la jaula (aproximadamente 700 °C con aluminio) y las expansiones durante el funcionamiento no permiten un buen desempeño de tales técnicas.

Para evitar las pulsaciones del campo se busca también escoger una relación adecuada de número de ranuras estator/rotor de tal manera que se presenten mayor cantidad de enfrentamientos de dientes estator-rotor y se eviten las pulsaciones. Como principio general se busca que el número de ranuras del rotor sea menor que el del estator.

Otra técnica usada para disminuir las pérdidas adicionales es la de “azular” el rotor. Consiste en someter a una llama intensa la superficie del rotor para eliminar el aluminio que haya podido quedar en los espacios interlaminares del núcleo y disminuir la posibilidad de circulación de corriente parásita en el núcleo. El término “azulado” proviene de la apariencia que toma la superficie del rotor cuando es sometido a este proceso.

2.1.3 Determinación de las pérdidas adicionales

Desde que se comenzó a analizar la problemática de las pérdidas adicionales, se han propuesto diferentes metodologías para la determinación de las pérdidas adicionales. Ya en 1939 se propuso un método para medición directa denominado “de rotación inversa”, que dada su complejidad y costo no es practicable. De todas maneras este método se presenta detalladamente más adelante.

Otra vía ha sido aprovechar la experiencia de mediciones realizadas en muchos laboratorios a lo largo de la historia, y asignar las pérdidas a partir de gráficas obtenidas de dicha experiencia. Este método sin embargo puede conducir a desviaciones grandes, más ahora que se han establecido categorías de eficiencia y una imprecisión puede cambiar de ubicación a un motor en dicha clasificación.

Más recientemente se han estudiado otras alternativas y se definió otro método de medición directa denominado Eh-Star, el cual ha demostrado ser un método relativamente fácil de aplicar y con resultados bastante aceptables.

Todos estos métodos han sido recopilados en las normas técnicas relacionadas con la eficiencia de los motores, y se analizan en forma detallada enseguida.

2.2 Análisis normativo

Para la determinación de las pérdidas adicionales se han desarrollado distintos métodos que han sido recogidos igualmente por las distintas normas (IEC, IEEE). Uno de ellos es en el que se determinan las pérdidas adicionales a partir de los resultados de la prueba de carga (Pérdidas residuales) y que fue explicado en el capítulo anterior como base para comparar los métodos de las distintas normas en la determinación de la eficiencia.

Ahora en este punto lo que se propone es analizar todos los métodos con el fin de profundizar en sus fundamentos, su metodología de ejecución, en la precisión y

ventajas ó desventajas de aplicación. Todo esto con el fin de concluir como se propone desde el inicio, cuál es el método más apropiado técnicamente y de utilización práctica en nuestro medio.

Los métodos a los que se hace referencia son:

- Determinación a partir de una prueba de carga con medición de torque (Pérdidas residuales).
- Determinación a partir de una prueba de rotor removido y una prueba de rotación inversa
- Determinación por un ajuste asignado
- Determinación a partir de una ensayo Eh-star

2.2.1 Determinación a partir de una prueba de carga con medición de torque (Pérdidas residuales).¹⁶

Este método se basa en la determinación de las denominadas pérdidas residuales para los distintos puntos de carga, la representación de estas pérdidas en función del torque, y un análisis de regresión para obtener las pérdidas adicionales.

2.2.1.1 Procedimiento

Las pérdidas residuales se determinan para cada punto de carga restándole a la potencia de entrada, lo siguiente: la potencia de salida en el eje, las pérdidas del devanado del estator a la resistencia de prueba, las pérdidas en el hierro, las pérdidas por fricción y ventilación y las pérdidas del devanado del rotor correspondientes al valor determinado de deslizamiento.

¹⁶ ([6] Norma IEC 60034-2-1, 2007)

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw} \quad (16)$$

2.2.1.2 Cálculo

Estas pérdidas adicionales son representadas como una función del torque al cuadrado, como se observa en la Figura 1, y con estos valores se realiza un análisis de regresión, bajo la expresión:

$$P_{Lr} = AT^2 + B \quad (17)$$

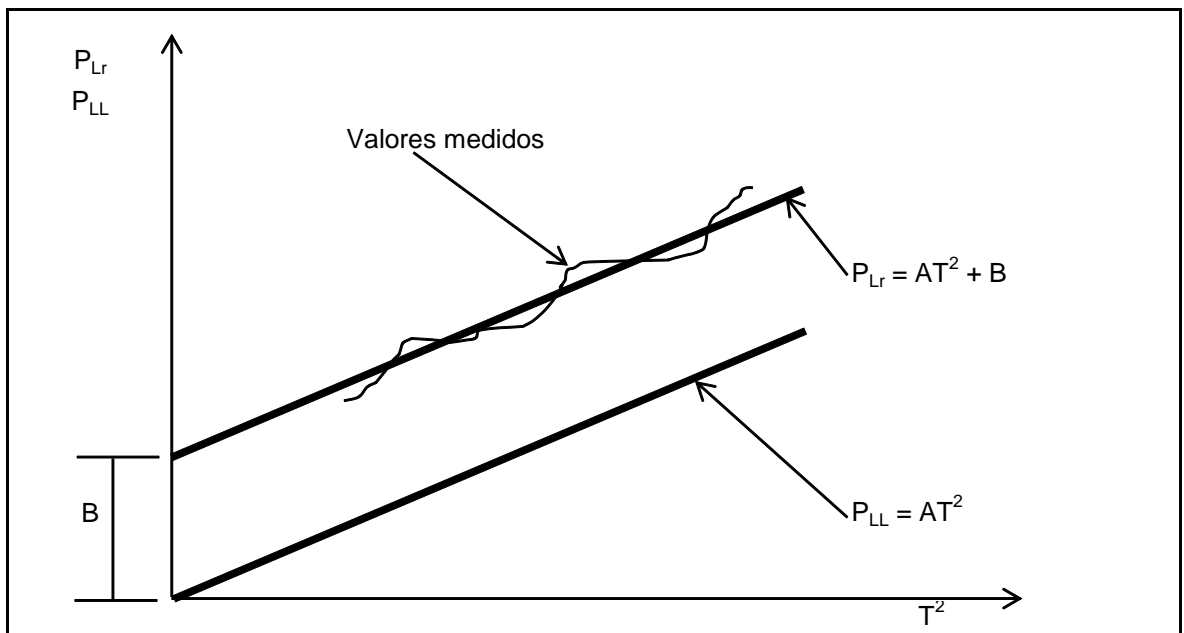


Figura 1. Regresión para suavización pérdidas residuales¹⁷

¹⁷ Fuente: Norma IEC 60034-2-1, 2007, Figura 10

Una vez determinados los coeficientes A y B, se calcula el índice de correlación. Si el índice de correlación es menor a 0,95 se elimina el peor valor y se repite la regresión. Si con esta acción el coeficiente de correlación continúa siendo inferior a 0,95 el resultado de la prueba es insatisfactorio, y esto es un indicio de que hay un error en la instrumentación ó en las lecturas instrumentos de prueba, ó ambas.

Si este caso llegare a suceder, se investiga la fuente del error, se analiza, se establecen los correctivos y la prueba se repite.

Una vez determinada la constante A, se puede estimar el valor de pérdidas adicionales para cada punto de carga mediante la expresión:

$$P_{LL} = A * T^2 \quad (18)$$

2.2.2 Determinación a partir de una prueba de rotor removido y una prueba de rotación inversa¹⁸

La determinación de las pérdidas se efectúa a partir de dos pruebas independientes, la primera se hace con la máquina sin el rotor y los resultados están asociados con las pérdidas adicionales a la frecuencia fundamental; y la segunda prueba se hace con rotación inversa y los resultados están asociados con las pérdidas adicionales a frecuencias superiores.

2.2.2.1 Procedimiento

¹⁸ ([6] Norma IEC 60034-2-1, 2007)

En ambas pruebas el motor se alimenta con un sistema de tensiones trifásico balanceado y de frecuencia igual a la frecuencia nominal del motor. Durante el ensayo se aplican cuatro diferentes valores de tensión de manera que el motor tome entre el 25% y el 100% de la corriente nominal y dos valores adicionales para corrientes superiores pero no mayores al 150% de la corriente nominal.

La corriente del rotor I_L se calcula así:

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_0^2} \quad (19)$$

Donde

I = Corriente del estator durante la prueba

I_0 = Corriente sin carga a tensión nominal

Prueba de rotor removido. Para esta prueba se retira el rotor, pero los platinos y demás partes en la que se puedan presentar corrientes por inducción deben permanecer en su posición. Se aplica entonces una señal de tensión de magnitud variable y se toman registros de corriente de entrada I_{rm} , potencia de entrada $P_{1\ rm}$, y temperatura del devanado estator θ_{rm} ; luego se calculan los valores de corriente del rotor $I_{L\ rm}$ y resistencia del devanado estator R_{rm}

Prueba de rotación inversa. Para esta prueba el motor, completamente ensamblado, se acopla a otro motor con el cual se impulsa el rotor del motor en prueba. La potencia del motor impulsor no debe ser menor que las pérdidas totales nominales del motor a probar ni mayor que cinco veces esa potencia.

Se ejecuta, entonces, la siguiente secuencia:

- a) Sin alimentar el estator del motor en prueba, se mueve su rotor a velocidad sincrónica pero en dirección contraria a la del campo magnético hasta que las pérdidas por fricción se estabilicen. Se registra la potencia $P_{0\ rr}$ suministrada por el motor auxiliar.
- b) Se le aplica tensión a la máquina en prueba hasta obtener valores de corriente iguales a los de la prueba con rotor removido. Para cada uno de estos valores de corriente, se registran los datos de corriente de entrada I_{rr} , potencia de entrada $P_{1\ rr}$ y temperatura del devanado estator $\theta_{w\ rr\ m}$ del motor en prueba, y también la potencia suministrada por el motor auxiliar $P_{D\ rr}$. Se calculan entonces los valores de corriente del rotor $I_{L\ rr}$ y resistencia del estator R_{rr} .

2.2.2.2 Cálculo

Con los valores obtenidos en las dos pruebas se construyen gráficas de las potencias de entrada $P_{1\ rm}$, $P_{1\ rr}$, y de la potencia en el eje ($P_{D\ rr} - P_{0\ rr}$) como funciones de la corriente, se les aplica una regresión logarítmica y se obtienen las expresiones:

$$P_{1\ rm} = A_{rm} * I_L^{N1} + B_{L\ rm} \quad (20)$$

$$P_{1\ rr} = A_{rr} * I_L^{N2} + B_{L\ rr} \quad (21)$$

$$P_{D\ rr} - P_{0\ rr} = A_{D\ rr} * I_L^{N3} + B_{D\ rr} \quad (22)$$

Donde

- $P_{1\text{ rm}}$ es el valor de potencia eléctrica de entrada durante la prueba de rotor removido
- $P_{1\text{ rr}}$ es el valor de la potencia eléctrica de entrada durante la prueba de rotación inversa
- $P_{D\text{ rr}}$ es el valor de la potencia mecánica suministrada por el motor auxiliar durante la prueba de rotación inversa cuando el estator del motor bajo prueba está energizado
- $P_{0\text{ rr}}$ es el valor de la potencia mecánica suministrada por el motor auxiliar durante la prueba de rotación inversa cuando el estator del motor bajo prueba no está energizado
- I_L son los valores de corriente del rotor correspondientes a cada uno de los valores de corriente del estator medidos durante las dos partes de la prueba (en cada parte los valores de corriente son los mismos)
- A,B son los coeficientes obtenidos mediante la regresión

Con estos resultados se realiza una homogenización de las curvas. Por tanto las ecuaciones para potencias serán finalmente:

$$P_{1\text{ rm}} = A_{\text{rm}} * I_L^{N1} \quad (23)$$

$$P_{1\text{ rr}} = A_{\text{rr}} * I_L^{N2} \quad (24)$$

$$P_{D\text{ rr}} - P_{0\text{ rr}} = A_{D\text{ rr}} * I_L^{N3} \quad (25)$$

Si los datos son precisos, cada curva mostrará una relación cuadrática entre la potencia y la corriente.

Ahora, teniendo en cuenta que las pérdidas adicionales para cada punto de operación son iguales a:

$$P_{LL} = P_{LL\ rm} + P_{LL\ rr} \quad (26)$$

Donde

$P_{LL\ rm}$ son las pérdidas adicionales a la frecuencia fundamental

$P_{LL\ rr}$ son las pérdidas adicionales a frecuencias superiores

Y las pérdidas adicionales a frecuencia fundamental están dadas por:

$$P_{LL\ rm} = P_{1\ rm} - (3 * I_L^2 * R_{s\ rm}) \quad (27)$$

$R_{s,rm}$ es el promedio de los valores de resistencia por fase del estator a la temperatura $\theta_{w,rm}$ durante la prueba de rotor removido

Y las pérdidas a frecuencias superiores está dadas por

$$P_{LL\ rr} = (P_{D\ rr} - P_{0\ rr}) - (P_{1\ rr} - P_{LL\ rm} - (3 * I_L^2 * R_{s\ rr})) \quad (28)$$

$R_{s,rr}$ es el promedio de los valores de resistencia por fase del estator a las temperaturas $\theta_{w,rr}$ durante la prueba de rotación inversa

Se obtiene entonces la siguiente expresión general para las pérdidas adicionales:

$$P_{LL} = A_{D\ rr} * I_L^{N3} + 2 * A_{rm} * I_L^{N1} - A_{rr} * I_L^{N2} - 6 * I_L^2 * (R_{s\ rm} - 0,5R_{s\ rr}) \quad (29)$$

Partiendo de esta expresión general, las pérdidas adicionales para una condición especificada de carga se pueden determinar así:

- a. Se calcula un valor de corriente de rotor I_{NL} correspondiente al valor nominal de la corriente de línea del estator I_N

$$I_{NL} = \sqrt{I_N^2 - I_0^2} \quad (30)$$

Donde:

I_N es el valor nominal de la corriente de línea

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

- b. Para la corriente I_{NL} , se calcula el valor nominal de las pérdidas adicionales en carga mediante la ecuación general indicada arriba, así:

$$P_{NLL} = A_{Drr} * I_{NL}^{N3} + 2 * A_{rm} * I_{NL}^{N1} - A_{rr} * I_{NL}^{N2} - 6 * I_{NL}^2 * (R_{srm} - 0,5R_{srr}) \quad (31)$$

- c. Se calcula el valor de la corriente de carga I_L para una determinada condición de operación

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_0^2} \quad (32)$$

Donde

I es el valor de la corriente de línea que toma la máquina en la condición de operación dada

d. Se calcula el valor de las pérdidas adicionales en carga para la condición de operación dada mediante la expresión

$$P_{LL} = P_{NL} * (I_L / I_{NL})^2 \quad (33)$$

2.2.3 Determinación por un ajuste asignado

Este método consiste en asignar un valor a las pérdidas adicionales en carga P_{LL} para la condición de potencia nominal del motor. Comúnmente el valor asignado es un porcentaje de la potencia de entrada P_1 , el cual se determina con base en la información de la gráfica de la Figura 2. De acuerdo con esta gráfica se definen tres intervalos de potencias nominales de motores y, para cada intervalo, se establece una función de pérdidas adicionales en carga, así:

$$\text{Para } P_2 \leq 1 \text{ kW} \quad P_{LL} = P_1 * 0,025$$

$$\text{Para } 1 \text{ kW} < P_2 < 10.000 \text{ kW} \quad P_{LL} = P_1 * [0,025 - 0,005 * \log_{10} (P_2)] \quad (34)$$

$$\text{Para } P_2 \geq 10.000 \text{ kW} \quad P_{LL} = P_1 * 0,005$$

Para cargas distintas a la nominal, se asume que las pérdidas adicionales en carga varían con el cuadrado del valor resultante de la resta entre el cuadrado de la corriente del estator y el cuadrado de la corriente sin carga.

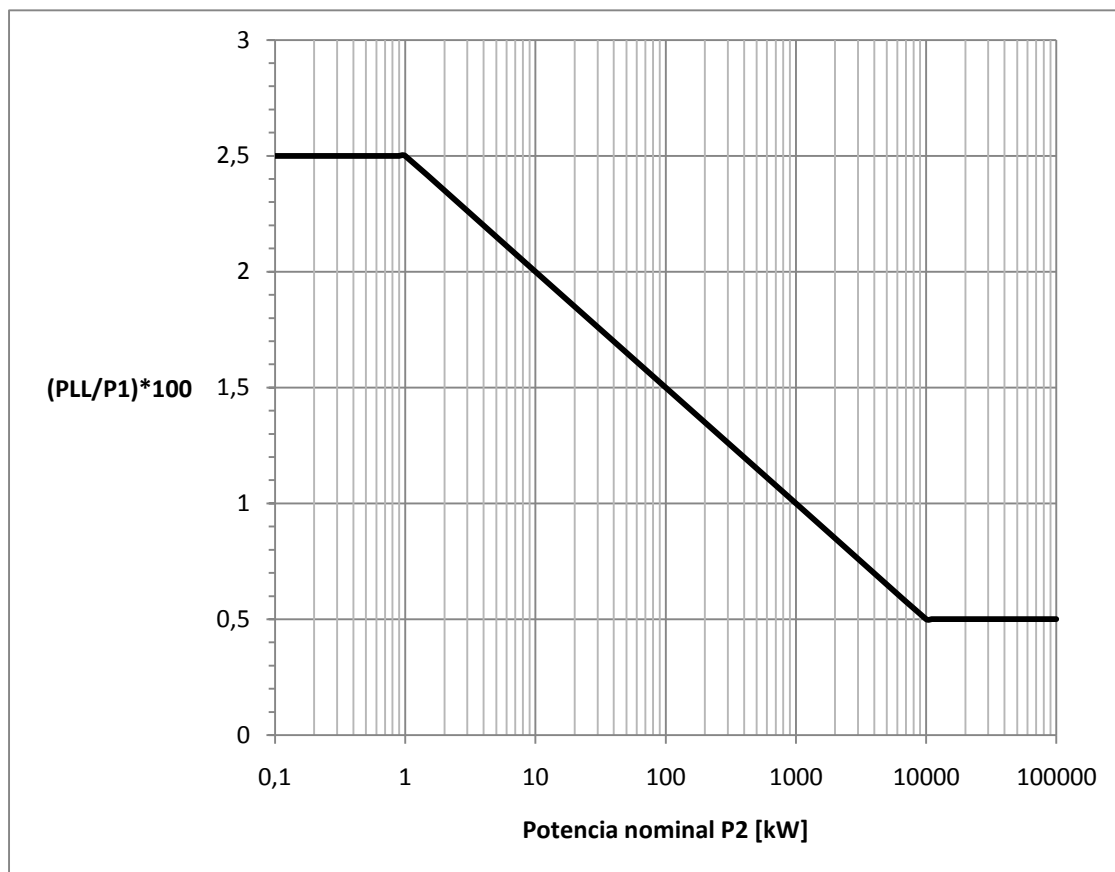


Figura 2. Curva para asignar pérdidas adicionales en carga¹⁹

Esta gráfica no representa un promedio, sino la envolvente superior de un gran número de pruebas; por tanto, puede producir resultados mayores a los obtenidos con los otros dos métodos descritos antes (método de ensayo en carga con medición de torque y método con prueba de rotor removido y prueba de rotación inversa).

2.2.4 Determinación a partir de un ensayo Eh-star

¹⁹ Fuente: Norma IEC 60034-2-1, 2007, Figura 11

Este método requiere la operación del motor sin carga y alimentado por una fuente de tensión desbalanceada. El circuito de prueba es el que se muestra en la figura 3:

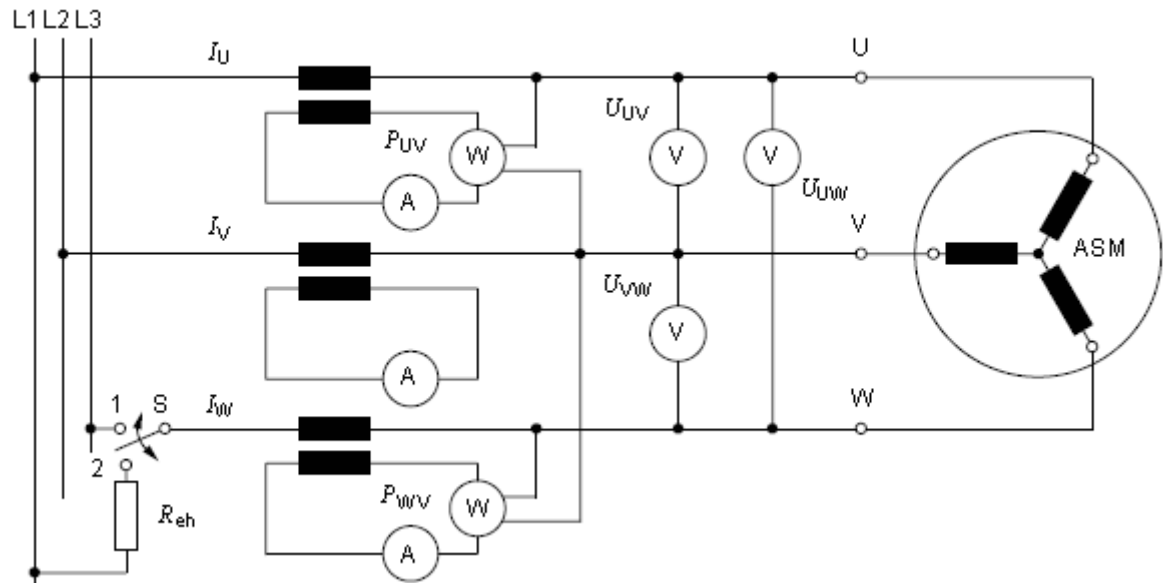


Figura 3. Diagrama del montaje para la prueba Eh-star²⁰

Si el motor a probar está especificado para conexión en delta, debe conectarse en estrella para ejecutar esta prueba. El punto neutro no se debe conectar a tierra para evitar la corriente de secuencia cero.

2.2.4.1 Procedimiento

En una de las fases del circuito de alimentación del motor se conecta una resistencia en serie R_{eh} cuyo valor debe ser aproximadamente igual a:

²⁰ Fuente: Norma IEC 60034-2-1, 2007, Figura 7

$$R'_{eh} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} \cdot 0.2 \quad (35)$$

Para motores con conexión nominal en estrella,

O igual a

$$R'_{eh} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{I_N} \cdot 0.2 \quad (36)$$

Para motores con conexión nominal en delta

La resistencia usada durante la prueba se ajusta de tal manera que la magnitud de la corriente de secuencia positiva $I_{(1)}$ se mantenga por debajo del 30% de la magnitud de la corriente de secuencia negativa $I_{(2)}$, y que la velocidad se mantenga muy cerca de la nominal. Se recomienda iniciar la prueba con la resistencia R_{eh} ajustada a un valor que no difiera en más de 20% del valor típico R'_{eh}

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

$$I_t = \sqrt{I_N^2 - I_0^2} \quad (37)$$

Y para motores con conexión nominal en delta

$$I_t = \frac{\sqrt{I_N^2 - I_0^2}}{\sqrt{3}} \quad (38)$$

Para motores con conexión nominal en estrella la tensión de prueba debe ser:

$$U_t = U_N \quad (39)$$

Y para motores con conexión nominal en delta:

$$U_t = U_N \cdot \sqrt{3} \quad (40)$$

Es importante tener en cuenta que antes de hacer esta prueba, se debe ejecutar la prueba sin carga.

Si la resistencia de desbalance se ha colocado en la línea que está conectada al terminal W del motor, entonces se mide la resistencia R_{VW} entre los terminales V y W del motor antes y después de la prueba completa y se registran los dos valores.

Para evitar el excesivo y desigual calentamiento de las tres fases del estator del motor, la prueba se lleva a cabo con la máquina fría, y las lecturas se deben tomar tan rápido como sea posible.

Los motores más grandes deben arrancarse sin la resistencia R_{eh} en el circuito (interruptor del esquema de montaje en la posición 1) y con tensión reducida (25...40% de la tensión nominal); después de que el motor haya arrancado se conmuta el interruptor a la posición 2 para conectar la resistencia. En motores pequeños se puede hacer el arranque con la resistencia R_{eh} conectada; caso en el cual no se requiere el interruptor.

Se varía entonces el valor de la tensión aplicada y se toman medidas correspondientes a seis condiciones diferentes caracterizadas por valores de corriente entre el 75% y el 150% de la corriente nominal medida en la fase V. Los seis valores de corriente deben estar uniformemente espaciados y la prueba se debe iniciar con el valor más alto de corriente; luego se va disminuyendo hasta tener la corriente de menor valor

Para cada punto de operación durante la prueba se registran los valores de I_U , I_V , I_W , U_{UV} , U_{VW} , U_{WU} , P_{UV} , P_{WV} , n .

Igualmente se mide la resistencia R_{VW} del motor antes y después de terminada la prueba. Para valores de corriente de prueba iguales al 100% de la corriente nominal o menores se considera como valor de R_{VW} el que se haya obtenido después de finalizada la prueba. Para las condiciones de prueba con corrientes en la fase V mayores al 100% de la corriente nominal, el valor de la resistencia R_{VW} se evalúa con base en una función de variación lineal entre los valores extremos medidos antes y después de la prueba

En este método no es permisible promediar los valores de las resistencias.

En este método, la resistencia también se puede determinar a partir de la medición de la temperatura del estator usando sensores embebidos en el devanado.

La potencia se debe medir estrictamente siguiendo las conexiones mostradas en el esquema. No es aceptable usar vatímetros que hagan internamente una conexión virtual en estrella.

Considerando los diferentes valores de corriente de prueba, en ningún caso el deslizamiento puede ser mayor que el doble del deslizamiento nominal, con lo cual se garantiza la precisión del ensayo. Si esta condición no se cumple, la prueba se repite incrementando el valor de la resistencia R_{eh} . Si el motor es inestable en algunos de los puntos de operación con corrientes inferiores a la corriente nominal, entonces estos puntos se omiten.

2.2.4.2 Cálculo

A partir de los resultados de prueba se calculan los valores complejos de voltajes y corrientes de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{UV} &= U_{UV} \\
 U'_{WU} &= \frac{U_{VW}^2 - U_{WU}^2 - U_{UV}^2}{2 \cdot U_{UV}} \\
 U''_{WU} &= \sqrt{U_{WU}^2 - U_{WU}'^2} \\
 U'_{VW} &= -U_{UV} - U'_{WU} \\
 U''_{VW} &= -U''_{WU} \\
 I'_V &= -\frac{(P_{UV} - P_{VW}) + U_{WU} \cdot I_W}{U_{UV}}
 \end{aligned} \tag{41}$$

En estas ecuaciones se asume que la corriente I_W está en fase con la tensión U_{WU} . En el caso que la impedancia del resistor adicionado para la prueba contenga una fuerte componente reactiva relativamente importante, el cálculo de la corriente se debe hacer utilizando la siguiente expresión:

$$I'_V = -\frac{(P_{UV} - P_{VW}) + R_{eh} \cdot I_W^2}{U_{UV}} \quad (42)$$

Donde R_{eh} es el valor medido de la componente resistiva.

$$\begin{aligned} I''_V &= \sqrt{I_V^2 - I_V'^2} \\ k_1 &= \frac{1}{2 \cdot I_V^2} \cdot (I_W^2 - I_U^2 - I_V^2) \\ I'_U &= k_1 \cdot I'_V + \sqrt{\left(k_1^2 - \frac{I_U^2}{I_V^2}\right)(I_V'^2 - I_V^2)} \\ I''_U &= \frac{k_1 I_V^2 - I'_U \cdot I'_V}{I_V''} \\ I'_W &= -I'_U - I'_V \\ I''_W &= -I''_U - I''_V \end{aligned} \quad (43)$$

Se determinan los voltajes interiores a partir de los voltajes de línea y corrientes complejos.

$$\begin{aligned} \underline{U}_{iUV} &= \underline{U}_{UV} + \frac{R_{VW}}{2} \cdot (\underline{I}_V - \underline{I}_U) \\ \underline{U}_{iVW} &= \underline{U}_{VW} + \frac{R_{VW}}{2} \cdot (\underline{I}_W - \underline{I}_V) \\ \underline{U}_{iWU} &= \underline{U}_{WU} + \frac{R_{VW}}{2} \cdot (\underline{I}_U - \underline{I}_W) \end{aligned} \quad (44)$$

Se separan las componentes línea-línea de secuencia positiva y negativa

$$\begin{aligned}\underline{U}_{iLL(1)} &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{iUV} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{iVW} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{iWU}) \\ \underline{U}_{iLL(2)} &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{iUV} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{iVW} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{iWU})\end{aligned}\quad (45)$$

$$(\underline{a} = e^{j2\pi/3})$$

Se determinan las componentes internas de fase del voltaje:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{i(1)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{j\frac{\pi}{6}} \cdot \underline{U}_{iLL(1)} \\ \underline{U}_{i(2)} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{j\frac{\pi}{6}} \cdot \underline{U}_{iLL(2)}\end{aligned}\quad (46)$$

Se determinan los voltajes internos asimétricos de fase:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{iU} &= \underline{U}_{i(1)} + \underline{U}_{i(2)} \\ \underline{U}_{iV} &= \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{i(1)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{i(2)} \\ \underline{U}_{iW} &= \underline{a} \cdot \underline{U}_{i(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{i(2)}\end{aligned}\quad (47)$$

Se determina la resistencia de pérdidas en el hierro

$$R_{fe} = \frac{U_t^2}{P_{fe}}\quad (47)$$

Con

$$\begin{aligned} \underline{I}_{feU} &= \frac{U_{iU}}{R_{fe}} \\ \underline{I}_{feV} &= \frac{U_{iV}}{R_{fe}} \\ \underline{I}_{feW} &= \frac{U_{iW}}{R_{fe}} \end{aligned} \tag{48}$$

Se calculan las corrientes internas de fase:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{iU} &= \underline{I}_U - \underline{I}_{feU} \\ \underline{I}_{iV} &= \underline{I}_V - \underline{I}_{feV} \\ \underline{I}_{iW} &= \underline{I}_W - \underline{I}_{feW} \end{aligned} \tag{49}$$

Se determinan las componentes de secuencia positiva y negativa de las corrientes internas de fase:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{i(1)} &= \frac{1}{3} \cdot \left(\underline{I}_{iU} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{iV} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{iW} \right) \\ \underline{I}_{i(2)} &= \frac{1}{3} \cdot \left(\underline{I}_{iU} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{iV} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{iW} \right) \end{aligned} \tag{50}$$

El valor absoluto de la corriente de secuencia positiva debe ser menor al 30% de la componente de secuencia negativa con el fin de lograr precisión en los resultados. Si esta condición no se cumple, la prueba debe ser repetida para otro valor de R_{eh} .

Se determina la potencia del entrehierro:

$$\begin{aligned} P_{\delta(1)} &= 3 \cdot (U'_{i(1)} \cdot I'_{i(1)} + U''_{i(1)} \cdot I''_{i(1)}) \\ P_{\delta(2)} &= 3 \cdot (U'_{i(2)} \cdot I'_{i(2)} + U''_{i(2)} \cdot I''_{i(2)}) \end{aligned} \quad (51)$$

Y por último se determinan las pérdidas adicionales:

$$P_{Lr} = k \cdot \left[(1-s) \cdot (P_{\delta(1)} - P_{\delta(2)}) - P_{fw} \right] \quad (52)$$

Donde

$$k = \frac{1}{1 + (I_{i(1)} / I_{i(2)})^2} \quad (53)$$

2.2.4.3 Suavización de los datos de pérdidas adicionales

Los datos de pérdidas adicionales se suavizan utilizando un análisis de regresión lineal. Las pérdidas deben ser expresadas como una función del cuadrado de la componente de secuencia negativa de la corriente $I_{i(2)}$ respecto a la corriente de prueba I_t .

$$P_{Lr} = A \cdot (I_{i(2)} / I_t) + B \quad (54)$$

Siguiendo un procedimiento similar al explicado en el numeral 2.1.1 se determinan las pérdidas adicionales:

$$P_{LL} = A * T^2 \quad (55)$$

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN PRÁCTICA DE LOS MÉTODOS PARA DETERMINAR PÉRDIDAS ADICIONALES EN CARGA

3.1 Selección y diseño de pruebas

Una vez considerado todo el análisis teórico expuesto en el capítulo anterior, y realizadas las pruebas comparativas de los métodos IEC (pérdidas adicionales con método de pérdidas residuales) e IEEE (método B) para la determinación de la eficiencia, se plantea entonces la validación práctica de los métodos directos para la determinación de las pérdidas adicionales.

Los métodos en los cuales se requiere validación práctica son:

- Método Eh-star
- Método de rotación inversa

3.2 Ejecución de las pruebas

3.2.1 Prueba Eh-Star

Este método es complejo en su formulación teórica, pero sencillo en su aplicación. Con la ejecución del proyecto de pregrado mencionado antes, se desarrolló la metodología de ejecución, y la forma de cálculo para la determinación de las resistencias de desbalance, así como las ecuaciones aplicables al manejo de los datos.

Con estos criterios, se determinaron entonces las resistencias necesarias para las pruebas. La Tabla 20 resume el resultado de este cálculo y la agrupación realizada para cubrir una cantidad de motores a probar con cuatro tipos distintos de resistencia.

Tabla 20. Resistencias necesarias para la prueba Eh-star

Resistencia Reh [Ohms]	Corriente Max [A]	Motores de Prueba	Cantidad de motores por N° Polos			Tamaños por N° de Polos		
			2	4	6	2	4	6
25	20	28	11	10	7	80-132	90-134	90-135
25	18	26	10	9	7	80-131	90-133	90-135
25	15	24	9	8	7	80-131	90-133	90-135
25	12	17	6	5	6	80-112	90-112	90-133
25	10	13	5	4	4	80-96	90-111	90-130
25	8	10	4	3	3	80-90	90-96	90-131
20	20	25	10	10	5	83-132	90-134	96-135
20	18	24	10	9	5	83-132	90-133	96-135
20	15	21	8	8	5	83-131	90-133	96-135
20	12	14	5	5	4	83-112	90-112	86-133
20	10	10	4	4	2	83-96	90-111	96-112
20	8	7	3	3	1	83-90	90-96	96
15	20	19	8	7	4	90-132	96-134	112-35
15	18	19	8	7	4	90-132	96-133	112-135
15	15	17	6	7	4	90-131	96-133	112-135
15	12	9	3	3	3	90-113	96-112	112-133
15	10	5	2	2	1	90-96	96-111	112
15	8	2	1	1	0	90	96	0
12	20	15	6	6	3	96-132	111-134	112-135
12	18	14	6	5	3	96-132	111-133	112-135
12	15	11	4	4	3	96-131	111-133	112-135
12	12	6	2	2	2	96-112	111-112	112-113
12	10	3	1	1	1	96	111	112
12	8	0	0	0	0	0	0	0
10	20	11	5	5	1	96-132	111-134	113
10	18	10	5	4	1	96-132	111-114	113
10	15	7	3	3	1	96-113	111-113	113
10	12	5	2	2	1	96-112	111-112	113
10	10	2	1	1	0	96	111	0
10	8	0	0	0	0	0	0	0
8	20	6	3	3	0	112-114	112-114	0
8	18	6	3	3	0	112-114	112-114	0
8	15	4	2	2	0	112-113	112-113	0
8	12	2	1	1	0	112	112	0
8	10	0	0	0	0	0	0	0
8	8	0	0	0	0	0	0	0

De los motores probados para validar los métodos de determinación de la eficiencia, se toman entonces algunos para aplicar la prueba Eh-Star. Se seleccionan motores del rango medio de potencia, pues a estos fue a los que previamente se les había realizado mayor cantidad de pruebas. Adicionalmente

son los motores que en forma más fácil es posible obtener los elementos adicionales de prueba tales como resistencias, por ejemplo.

Se toman entonces para estas pruebas los motores de 4, 5 y 7,5 HP en 4 polos

Tomando en consideración estos valores de resistencia y todos los aspectos normativos y teóricos indicados antes se llevaron a cabo las pruebas Eh-star a la muestra seleccionada.

Los resultados de estas pruebas se pueden observar en la Tabla 21 junto con los valores resultantes de los métodos de pérdidas residuales y pérdidas asignadas.

Tabla 21. Resultados comparativos de pérdidas adicionales

Motor	Potencia		Nº Polos	Perdidas Adicionales			
	HP	KW		Prueba Eh 1	Prueba Eh 2	PLr, IEC	PLL asignadas
1LA7 111-4YA60	4	2,98	4	225,05	239,86	217,00	82,42
1LA7 112-4YA60	5	3,73	4	290,02	254,48	185,59	98,47
1LA7 114-4YA60	7,5	5,60	4	229,09	248,89	274,47	142,45

3.2.2 Prueba de rotación inversa

Este método es complicado en su aplicación pues consta de dos partes: la primera alimentando el estator sin la presencia del rotor, y la segunda con el rotor colocado, pero alimentado el estator y conduciendo el rotor en sentido contrario al campo magnético, al tiempo que se debe medir la potencia tanto eléctrica como mecánica que consume el motor bajo prueba.

Como la conducción del rotor durante la segunda parte se debe hacer a velocidad sincrónica, se planteó y desarrolló para este trabajo, la alternativa de calibrar en el freno un grupo motor-variador para poder determinar la potencia mecánica solicitada por el motor bajo prueba según este método.

Para la aplicación de este método se deben tener en cuenta varias consideraciones, a saber:

- En las versiones actuales de las normas, este método es calificado como de alta incertidumbre y no aceptado para pruebas, a pesar que está considerado en dichas normas.^{21 22}
- Este es el primer método desarrollado para evaluar pérdidas adicionales (data de 1939) y siempre ha estado objetado por su costo y grado de imprecisión.²³
- Para cada tipo de motor a probar se requiere calibrar un grupo motor-variador distinto, lo cual lo hace demasiado costoso.

El análisis experimental de este método se llevó a cabo con un motor tipo 1LA7 113-6 de 4,0 HP, 6 polos, para lo cual se realizaron pruebas completas según los métodos de pérdidas residuales IEC e IEEE, como también la prueba Eh-Star, para finalmente aplicar el método de rotor removido y rotación inversa. Para este último caso se siguió lo indicado en el procedimiento de las normas, pero haciendo dos variantes para facilitar su ejecución:

- Se cambió el orden de las pruebas, pues al disponer de un motor para pruebas, es más fácil hacer primero la prueba de rotación inversa, pues no se debe desensamblar nada.
- No se midió directamente la potencia mecánica necesaria para llevar el motor bajo prueba en sentido contrario al campo magnético a velocidad

²¹ ([3] Norma IEEE 112, 2004)

²² ([6] Norma IEC 60034-2-1, 2007)

²³ ([7] B.J. Chalmers, October 1963)

sincrónica, sino que se tomó un grupo variador-motor auxiliar que luego se calibró en el freno de potencia en el rango de corrientes leídas durante la prueba.

Tabla 22. Resultados comparativos de pérdidas adicionales

METODO	P_{LL} [W]
Perdidas Residuales IEC	165,590
Perdidas Residuales IEEE	166,000
Metodo Resistencia Eh	186,148
Rotor Removido IEC	152,230

De estos valores se puede observar que los métodos de pérdidas residuales IEC e IEEE arrojan básicamente los mismos valores de pérdidas adicionales. Esto es consistente con los resultados mostrados en el capítulo 2, aunque aquí se observan valores mucho más cercanos.

Igualmente alineado con resultados obtenidos en los motores de 4 polos, presentados en la Tabla 21, las pérdidas obtenidas por el método Eh-Star tienden a dar valores mayores. El método de rotor removido y rotación inversa produce un valor de pérdidas adicionales menor que los otros dos, explicable porque al retirar el rotor, el flujo de dispersión no induce tensiones en partes metálicas como las zonas del eje que se encuentran en la región de su influencia en caso que estuviera presente.

3.3 Evaluación técnica

3.3.1 Método de las pérdidas residuales

Hoy en día es el método más aceptado para determinar la eficiencia de los motores, y así lo han recogido las dos normas principales que existen en el mundo para dicha evaluación. Este método exige las cuatro pruebas indicadas antes y el manejo de datos y correcciones de los resultados establecidos en cada norma.

En particular la rutina de cálculo para las pérdidas adicionales establecidas en las dos normas, llevan a valores ligeramente diferentes en pérdidas adicionales. Estas diferencias, el desacuerdo que aún persiste en la interpretación de las causas y los métodos para llegar al valor verdadero, y el ánimo de investigadores para profundizar en el tema son las razones que hacen válido el que aun se mantengan vigentes métodos para la determinación directa.

Continuar con estas investigaciones puede contribuir a lograr mayores niveles de eficiencia, que se exigen cada vez con mayor énfasis en todo el mundo.

3.3.2 Método de las pérdidas asignadas

Aunque este método recoge la experiencia de muchas mediciones en el mundo, este método solo permite tener una idea aproximada de la eficiencia de un motor, pero no es suficiente para definir con precisión la eficiencia y la categoría a la que pertenece, pues los límites son tan cercanos que una desviación en pérdidas adicionales lo puede ubicar falsamente en una mejor ó peor categoría.

3.3.3 Método Eh-Star

Este método es relativamente sencillo en su aplicación aunque tiene una fundamentación teórica compleja, basada en el concepto de las componentes simétricas, y que busca simular el método de la rotación inversa, pero sin las dificultades e imprecisiones prácticas de aquel.

Se debe determinar una resistencia que permita el desbalance apropiado, pero se ha encontrado que con un rango de resistencias es posible probar varias potencias.

Tiene la limitación que es aplicable a motores conectados en estrella. Por tanto para aplicarlo a un motor conectado en delta, es necesaria su reconexión y corrección de los parámetros de prueba.

3.3.4 Método de rotación inversa

Este método es muy complejo para su ejecución. En la primera parte del procedimiento se debe retirar el rotor y colocar todas las demás partes susceptibles de inducción en su sitio, esto es, tapas (platinos), tornillería, tapabalineras, arandelas de presión, rodamientos ventiladores (si son metálicos) y caperuzas (cubiertas del ventilador). En esta condición se debe alimentar el estator, y por tanto esto exige una tensión muy reducida. Todo esto se realiza para determinar las pérdidas adicionales a la frecuencia de la red, producidas principalmente por el flujo de dispersión. Realizado así ya tiene una objeción técnica, pues desconoce, inducción en algunas partes del rotor que son alcanzadas por el flujo de dispersión en funcionamiento normal, y que durante la prueba no se obtienen, por la ausencia del mismo.

En la segunda parte se debe acoplar el motor a otro motor que lo lleve a velocidad sincrónica en sentido contrario al campo magnético, energizar el estator y medir tanto la potencia mecánica como la eléctrica en esta condición. Previo a la energización del estator se debe haber medido también la potencia mecánica de entrada. Esta condición de prueba exige entonces que se fabrique un motor auxiliar especial que pueda ser acoplado a un dinamómetro y simultáneamente al motor bajo prueba.

El motor auxiliar debe cumplir condiciones para servir como tal, relacionadas con la potencia del mismo en comparación con las pérdidas del motor a probar y en comparación con las pérdidas a medir. Esto hace que difícilmente un motor auxiliar sirva para muchos motores a probar.

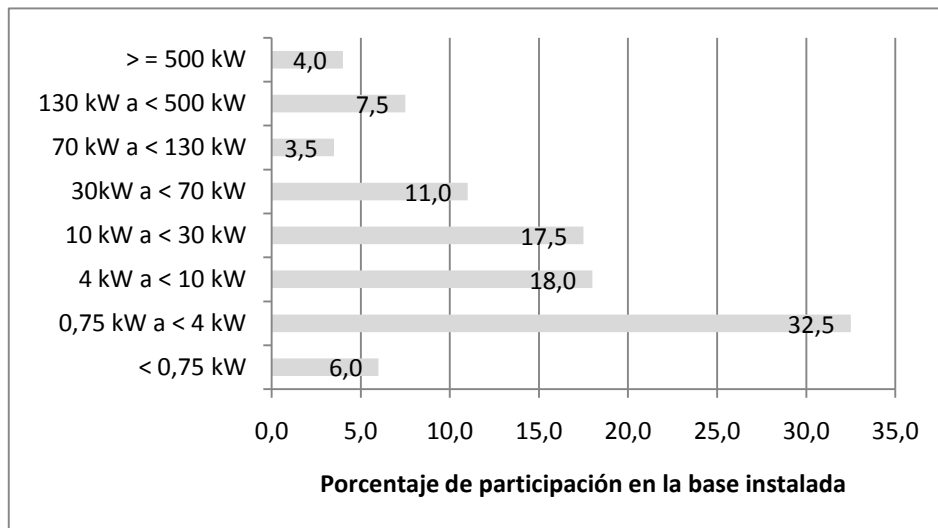
3.4 Evaluación económica

La determinación de la eficiencia de un motor, independiente de cuál sea el método aplicable para la evaluación de las pérdidas adicionales, requiere de la ejecución de pruebas tales como la prueba de temperatura a carga nominal, prueba de carga a distintos valores de carga y prueba de vacío. Esto, unido a las exigencias de precisión de la instrumentación, condiciones ambientales y requerimientos de manejo de los motores, definen unos requerimientos de inversión considerables.

La Figura 4 muestra la distribución por potencias de la base instalada de motores en el mundo²⁴. Se puede ver fácilmente que si se realiza un análisis de Pareto, el 80% de los motores están en potencias hasta 500 kW. Por otro lado, analizando los catálogos de fabricantes de motores, la mayoría ofrece en sus líneas estándar motores hasta 300 HP en 2 polos. Aplicado esto a un posible proyecto de implementación de laboratorio en nuestro medio, se realiza a continuación un análisis bajo la premisa de un laboratorio con alcance de prueba hasta 300 HP.

²⁴ ([2] Norma IEC 60034-30, 2008)

Figura 4. Base instalada de motores en el mundo²⁵



Al planear la ejecución de pruebas de eficiencia se deben considerar las siguientes necesidades:

Área	<ul style="list-style-type: none"> • Ubicación de al menos dos frenos de potencia para cubrir el rango de potencias consideradas. • Ubicación de la(s) fuente(s) de tensión variable • Ubicación de los equipos de maniobra de la(s) fuente(s) de tensión • Ubicación de los equipos de control y medida
Fuente de alimentación de tensión	<ul style="list-style-type: none"> • Generador sincrónico con tensión regulable. Se requiere entonces un motor que accione este generador y un variador que controle su velocidad.
Equipo de manejo de carga	<ul style="list-style-type: none"> • Polipasto para ubicación en la mesa del freno

²⁵ Fuente: Norma IEC 60034-30, 2008, Figura 1

Frenos para simulación de carga	<ul style="list-style-type: none"> • Freno de potencia hasta 300 HP • Freno de potencia hasta 30 HP • Mesa regulable para ubicación del motor bajo prueba
Instrumentos de medida	<ul style="list-style-type: none"> • Mili-óhmetro • Analizador de redes • Registradores de temperatura • Otros instrumentos auxiliares como multímetros, amperímetros, voltímetros. • Tacómetro
Personal	<ul style="list-style-type: none"> • Ingeniero calificado en el tema de la eficiencia y métodos de prueba • Técnico auxiliar para la ejecución de las pruebas
Calificación del laboratorio	<ul style="list-style-type: none"> • El laboratorio debe estar debidamente acreditado
Herramienta básica de taller	<ul style="list-style-type: none"> • Se requieren herramientas básicas

Partiendo de este cuadro de necesidades, las inversiones requeridas son las que se indican en la Tabla 23:

Tabla 23. Inversiones para laboratorio de pruebas de eficiencia

Equipo	Características principales	Valor en USD
Generador sincrónico	315 KVA	20.000
Motor asincrónico	400 HP	15.000
Variador de velocidad	400 HP	30.000
Polipasto	2 toneladas	10.675
Freno de potencia	300 HP	121.320
Freno de potencia	30 HP	50.000
Mesas regulables para ubicación motores		18.500
Mili-óhmetro		1.640
Analizador de redes	Precisión 0,1	24.464
Registrador de temperatura		5.000
Multímetros, amperímetros, voltímetros auxiliares		3.575
Tacómetro		2.000
Herramienta básica de taller		1.000
Computador		1.250
Acreditación del laboratorio		5.000
Total		309.424

En esta relación no se considera la inversión del área, pues en el modelo financiero se trabaja bajo la modalidad de arriendo.

Si adicionalmente se requiere dotar al laboratorio para probar los otros métodos de pruebas adicionales, se requieren inversiones adicionales, derivadas de los requisitos de las mismas.

Para aplicar el método Eh-Star en el rango de potencias consideradas, se requiere adicionalmente los elementos indicados en la Tabla 24:

Tabla 24. Inversiones adicionales para método Eh-Star

Equipo	Características principales	Valor en USD
Resistencia	12 kW, 0-30 Ohm	2.700
Sistema de conmutación	Contactador 17 A, selector	250
Watímetros		1.400
Voltímetros		675
Amperímetros		1.500
TC	Clase 0,2	525
Total		7.050

Y para la ejecución de la prueba de rotor removido y rotación inversa, se requiere adicionalmente lo indicado en la Tabla 25. Son necesarios varios motores calibrados y variadores de velocidad, pues se requiere cumplir el requisito que el motor que acciona el rotor en sentido contrario al campo magnético, debe tener una potencia nominal que esté en el rango de las pérdidas nominales del motor a probar y 5 veces el mismo, condición que para el rango de motores analizado no se puede cumplir con un único motor de accionamiento.

Tabla 25. Inversiones adicionales para la prueba de rotor removido y rotación inversa

Equipo	Características principales	Valor en USD
Motor calibrado	2 HP, 2 Polos	310
Motor calibrado	10 HP, 2 Polos	800
Motor calibrado	50 HP, 2 Polos	3.300
Variador de velocidad	2 HP	500
Variador de velocidad	10 HP	2.700
Variador de velocidad	50 HP	10.500
Total		18.110

En resumen, la inversión total requerida para tener una infraestructura adecuada para la ejecución de pruebas completas de eficiencia de motores de inducción en el rango hasta 300 HP, son las que se indican en la Tabla 26.

Tabla 26. Inversiones totales laboratorio de pruebas eficiencia

Prueba	Inversión en USD
Pruebas de eficiencia por método indirecto	309.424
Adicional para pruebas Eh-Star	7.050
Adicional para pruebas de rotor removido y rotación inversa	18.110
Total	334.584

Para terminar la evaluación del caso de negocio, se debe entonces calcular el costo de realizar una prueba de eficiencia, teniendo en cuenta los costos fijos y variable de su ejecución.

Un cuadro de costos fijos mensuales para el laboratorio analizado es el mostrado en la Tabla 27:

Tabla 27. Costos fijos del laboratorio de pruebas

Descripción	Costo en USD
Amortización de la inversión	6.134
Arrendamiento del local	608
Personal directo	4.480
Costos fijos servicios	50
Mantenimiento de la acreditación	125
Administración	456
Total	11.853

Si consideramos que se trabaja en un turno normal de 48 horas/semana, y teniendo en cuenta las pausas legales y extralegales, tomamos un tiempo efectivo de 46 horas semana (184 horas/mes). Con esto tenemos que el costo fijo a cubrir por hora es de:

$$\text{Costo fijo hora} = 11.853 / 184 = 64,42 \text{ USD / hora} \quad (56)$$

Si tomamos como una primera referencia un motor del tamaño constructivo IEC 112, para el cual la secuencia completa de pruebas para determinar la eficiencia, ya sea por el método IEEE 112-B ó por IEC 60034-2-1 con determinación de pérdidas por el método de segregación de pérdidas, toma un tiempo en promedio de 4,5 horas, los costos fijos son:

$$\text{Costos fijos} = 64,42 \text{ USD/hora} * 4,5 \text{ horas} = 289,89 \text{ USD} \quad (57)$$

Los costos variables dependen del consumo de energía durante la prueba. Para el motor en consideración, el consumo de potencia durante la prueba es de aproximadamente de 5 kW, potencia que es suministrada desde la fuente de tensión, en nuestro caso de análisis un grupo motor-generador alimentado a su vez por un variador de velocidad. Dado que el equipo es dimensionado para la máxima potencia de motor a probar, el sistema en esta condición tiene una eficiencia muy baja, por lo que podemos estimar que la potencia total requerida en el laboratorio es de:

$$P = 5 \text{ kW} / 0,4 = 12,5 \text{ kW} \quad (58)$$

Es decir que la energía consumida durante la prueba es de:

$$E = 12,5 * 4,5 = 56,25 \text{ kWh} \quad (59)$$

Cuyo costo es de:

$$\text{Costo de energía} = 56,25 \text{ kWh} * 0,13 \text{ USD/kWh} = 7,31 \text{ USD} \quad (60)$$

Si agregamos un costo de 5% por otros insumos menores como termocuplas, limpiadores, abrazaderas, siliconas, etc. los costos variables son de

$$\text{Costos variables} = 1,05 * 7,31 = 7,68 \text{ USD} \quad (61)$$

Finalmente tenemos entonces que realizar una prueba completa de eficiencia en un motor del tamaño IEC 112 tendrá un costo de:

$$\text{Costo total} = 289,89 + 7,68 = 297,57 \text{ USD} \quad (62)$$

Sin embargo, para un motor de 300 HP, en el cual las pérdidas estén en el orden de 25 kW, siguiendo la misma secuencia de cálculo, la potencia requerida en el laboratorio durante la prueba es de:

$$P = 25 \text{ kW} / 0,8 = 31,25 \text{ kW} \quad (63)$$

En este caso la prueba toma un mayor tiempo debido a la preparación y manejo de este motor, como al tiempo que se requiere para su estabilización térmica. La prueba requiere 7 horas. Por tanto la energía consumida es de:

$$E = 31,25 \text{ kW} * 7 \text{ h} = 218,75 \text{ kWh} \quad (64)$$

Cuyo costo es de:

$$\text{Costo energía} = 218,75 \text{ kWh} * 0,13 \text{ USD} / \text{kWh} = 28,44 \text{ USD} \quad (65)$$

Y el costo total:

$$\text{Costo total} = 64,42 * 7 + 28,44 + 0,05 * 28,44 = 466,80 \text{ USD} \quad (66)$$

Analizando estos dos casos típicos, se observa que el costo de las pruebas está determinado principalmente por el valor de las inversiones necesarias para la adecuación del laboratorio, lo cual hace que para motores pequeños la prueba sea muy costosa comparado con su precio, pues llega a ser hasta el 60%, mientras que para un motor de 300 HP representa el 3% del precio de lista.

Los métodos de medición directa de las pérdidas adicionales, es decir, el método Eh-Star y el método de rotor removido y rotación inversa, son métodos que demandan tiempos adicionales de prueba, los cuales junto con sus costos se presentan en la Tabla 28, para el caso de un motor de 300 HP.

Tabla 28. Costo adicional para métodos de medición directa de pérdidas adicionales

Prueba	Tiempo de ejecución en horas	Costo en USD
Eh-Star	2	128,84
Rotación inversa	4	257,68

Vale la pena hacer énfasis en que estos costos son adicionales, pues de todas maneras se requiere la secuencia completa de pruebas establecida en las normas para determinar la eficiencia.

CAPITULO 4: CONCLUSIONES

4.1 Capacidad para la ejecución de pruebas de eficiencia

Aunque en varias partes del mundo se han realizado estudios similares a los desarrollados en esta investigación, ésta es la primera vez que, en nuestro medio, se hace una validación práctica de mediciones de eficiencia, lo que ha permitido demostrar nuestra capacidad real para ejecutar pruebas de esta naturaleza con la precisión exigida.

Las pruebas necesarias para la determinación de la eficiencia de los motores eléctricos requieren unas condiciones muy exigentes, y por tanto para su ejecución fue necesario analizar y ajustar todas las condiciones del laboratorio, de los equipos a probar, de los instrumentos de medición, de los montajes y de los procedimientos de prueba para garantizar la precisión exigida por las normas.

4.2 Estudio alineado con otros trabajos nacionales e internacionales

Durante la fase de preparación de la nueva norma para la determinación de la eficiencia en motores de inducción, es decir, la norma IEC 60034-2-1 se llevaron a cabo varios estudios de comparación entre los métodos en distintas partes del mundo^{26 27 28}. Algunos de ellos realizaron comparaciones de datos medidos por

²⁶ ([8] M. Aoulkadi, 2007)

²⁷ ([11] Dae-Hyun Koo, 2008)

²⁸ ([12] M. Aoulkadi, Mar.2008)

distintos métodos, otros hicieron comparaciones teóricas y unos más realizaron comparaciones entre datos medidos y cálculos teóricos.

M. Aoulkadi y otros²⁹ presentaron en 2007 un trabajo comparativo entre distintas alternativas para aplicar el método de determinación de pérdidas adicionales en carga *eh-star*, y realizó un análisis comparativo teórico de estas metodologías, tomando como referencia un caso simulado. Para el presente estudio se utilizó la metodología denominada A en el mencionado trabajo, pues en este se concluye como recomendado por su simplicidad. Además los resultados se encuentran dentro del 1% de desviación comparado con las otras metodologías.

Los mismos autores presentaron en 2008 un estudio³⁰ en que analizan los diferentes métodos para determinar las pérdidas adicionales en carga. Este estudio se realizó con una muestra de 19 unidades de motores con potencias nominales de 1,1 5,5 y 11,0 kW. En el estudio presentado en este documento se probaron 32 motores con un espectro de potencias entre 1 y 100 HP, lo cual permite obtener nuevas conclusiones respecto al tema de la eficiencia de los motores y sus métodos de prueba, adicional a que el estudio en referencia, aunque no lo indica explícitamente, fue seguramente realizado a 50 Hz (fue realizado en Alemania con motores estándar producidos en Europa), y el actual a 60 Hz. Los estudios coinciden en algunos de los resultados, como por ejemplo en las diferencias que presenta el método de rotor removido y rotación inversa, así como en los valores bajos de pérdidas adicionales en carga que produce el método de las pérdidas asignadas.

²⁹ ([8] M. Aoulkadi, 2007)

³⁰ ([12] M. Aoulkadi, Mar.2008)

En 2008 igualmente fue presentado otro estudio realizado en Korea³¹ con una muestra de 6 motores para estudiar la diferencia de eficiencia en los motores obtenida por los distintos métodos disponibles. Se coincide en el análisis de las causas de las diferencias encontradas, particularmente en la diferencia de valores de pérdidas en el hierro y como consecuencia de estas, la diferencia en las pérdidas de fricción y ventilación. Igualmente se coincide en la conclusión respecto al bajo valor de pérdidas adicionales en carga que produce el método de valores asignados.

Posterior a la publicación de la norma IEC 60034-2-1, se han realizado pocos estudios comparativos entre los métodos para determinar la eficiencia. Uno de ellos,³² presentado en 2009, realizó pruebas a 50 Hz con 6 motores entre 5,5 y 150 kW. Sus conclusiones están alineadas en general con el estudio actual, en el sentido que los valores de eficiencia al final son muy similares con las dos metodologías IEEE 112 e IEC 60034-2-1, pero en las componentes si hay desviaciones entre ellas.

Internacionalmente se han realizado otros estudios relacionados con las pérdidas adicionales en carga, pero orientados a tópicos específicos como la modelación en circuito equivalente de estas pérdidas³³, la comparación entre los resultados medidos y calculados analíticamente de los valores de pérdidas adicionales³⁴, ó, más recientemente, el impacto del voltaje de la fuente de alimentación en las

³¹ ([11] Dae-Hyun Koo, 2008)

³² ([15] Cao, Sep 2009)

³³ ([9] A. Boglietti, Nov.2007)

³⁴ ([10] A R. Hagen, 2008)

pérdidas adicionales en carga³⁵. Casi simultáneo con esta investigación se realizó un estudio cuyo objetivo fue analizar los resultados de eficiencia obtenidos por el método de asignación de pérdidas adicionales³⁶, el cual tomó datos de motores probados en varias partes del mundo, pero en sí no ejecutó pruebas de validación.

En Colombia se está iniciando la actividad investigativa en el tema de la eficiencia de los motores eléctricos. Un antecedente importante es el estudio realizado por un grupo de investigación de la Universidad Autónoma de Occidente,³⁷ el cual analizó métodos para estimar en sitio de operación, no medida en laboratorio, la eficiencia de los motores. Los resultados no son comparables con el presente estudio, pues solamente toca tangencialmente el tema de las pérdidas adicionales en carga, pero es un aporte adicional a esta línea de investigación

Todo lo anterior muestra que este trabajo se constituye en pionero de estudios de eficiencia de motores llevados a cabo con base en las nuevas versiones de la norma, realizados a 60 Hz y con una muestra considerable de motores.

4.3 Oportunidad y pertinencia del estudio

Actualmente, en el país se inicia el proyecto de la puesta en marcha de una reglamentación para establecer el etiquetado de motores eléctricos con el fin de clasificarlos de acuerdo con su eficiencia. Los resultados de esta investigación, obtenidos precisamente en estos momentos tienen, por tanto, un alto grado de pertinencia y oportunidad. Además, han servido de base para tomar decisiones

³⁵ ([13] Aldo Boglietti, 2010)

³⁶ ([14] Emmanuel B. Agamloh, Nov.2010)

³⁷ ([16] Enrique Quispe, Sep.2009)

encaminadas a adecuar el laboratorio de SIEMENS MANUFACTURING S.A., y para iniciar los trámites necesarios para obtener su acreditación.

4.4 Base para continuar línea de investigación

Hoy por hoy, para dirimir si se acepta o no el valor de eficiencia declarada por un fabricante, se considera suficiente el método de las pérdidas residuales. Pero los niveles de eficiencia, cada vez más altos, exigidos por los mercados actuales y el estrecho margen entre una categoría y otra convierten en indispensable la necesidad de continuar estudiando procedimientos y métodos de ensayo para la determinación directa de las pérdidas adicionales, pues pueden constituirse en el factor clave para la definición cierta de la eficiencia de un motor y su ubicación en una categoría dada.

4.5 Inversiones para dotación de laboratorios y costos de ejecución de pruebas

El diseño y la dotación de un laboratorio para la ejecución de pruebas de eficiencia en motores de inducción es un proyecto que requiere esfuerzos financieros importantes, los cuales podrían ser asumidos únicamente por grandes empresas, o mediante la asociación de instituciones que en forma conjunta hagan aportes para su realización. De todas maneras es importante que el país tenga normas y métodos para la determinación de pérdidas adicionales y cálculos de eficiencia. En una primera fase se puede adoptar el método de las pérdidas residuales, pero es indispensable continuar estudiando y perfeccionando los métodos de medición directa de las pérdidas adicionales.

4.6 Participación con criterio en decisiones de normalización y regulación en el país y la región

Dada la importancia, es recomendable continuar investigando en temas relacionados con eficiencia de motores eléctricos, sobre todo si se tiene en cuenta que ya hay voces que pregonan que en no mucho tiempo podría cambiar, inclusive, la tecnología de fabricación de los motores para lograr los mayores niveles de calidad y de eficiencia que se exigirán en el futuro.

Acorde con esto vendrá la necesidad de adoptar nuevas normas y reglamentaciones técnicas con alcance nacional y regional, trámite en el cual la ingeniería nacional está llamada a participar con criterio. Solamente estudios de esta naturaleza permitirán asumir con criterio esta responsabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Norma NEMA MG1. (2005). *NEMA MG1. NEMA standard publication No MG 1-2005. Motors and Generators*. Rosslyn, Virginia.
- [2] Norma IEC 60034-30. (2008). *IEC 60034-30 Ed. 1: Efficiency classes of single speed three-phase cage induction motors*. Geneva, Switzerland.
- [3] Norma IEEE 112. (2004). *IEEE Standard test procedure for polyphase induction motors and generators*. New York.
- [4] Nailen, R. L. (August 1997). *Stray load loss: What's it all about*. Electrical Apparatus Magazine. Barks Publication, Inc. 400 N. Michigan Avenue, Suite 900 Chicago, IL 60611.
- [5] M.Aoulkadi, A. Binder, G. Joksimovic. Institut für Elektrische Energiewandlung, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt, Germany. (2005). *Additional losses in high speed induction machine - removed rotor test*. IEEE Publication, Power Electronics and Applications, 2005 European Conference.
- [6] Norma IEC 60034-2-1. (2007). *Method for determining losses and efficiency from tests*. Geneva, Switzerland.
- [7] B.J. Chalmers, A. C. Williamson. Manchester College of Science and Technology and English Electric Co. (October 1963). *Stray losses in squirrel cage induction motors - Validity of the reverse rotation test method*. Proceedings IEE, Volumen 110, Número 10.
- [8] M. Aoulkadi, A. Binder. Department of Electrical Energy Conversion, Darmstadt University of Technology. Darmstadt, Germany. (2007). *Comparison of different evaluation methods to determine Stray Load Losses in induction machines with eh-star method*. IEEE Publication, Industry Applications, IEEE Transactions.
- [9] A. Boglietti, A. Cavagnino, L. Ferraris, M. Lazzari. Politecnico di Torino. Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Italy. (Nov.2007). *Induction Motor Equivalent Circuit Including the Stray Load Losses in the Machine Power Balance*. IEEE Publication, Industrial Electronics Society, 2007, IECON 2007, 33rd Annual Conference of the IEEE.
- [10] A R. Hagen, A. Binder, M. Aoulkadi, T. Knopik, K. Bradley. Department of Electrical Energy Conversion, Darmstadt University of Technology. Darmstadt, Germany. (2008). *Comparison of measured and analytically calculated stray load losses in standard cage induction machines*. IEEE Publication, Electrical Machines, 2008, ICEM 2008, 18th International Conference.

- [11] Dae-Hyun Koo, Mi-Jung Kim, Pil-Wan Han, Jae-Hak Choi, Yon-Do Chun, Yun-Hyun Cho. Industry Application Research Division, Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, Korea. Department of Electrical Engineering, Donga University, Busan, Korea. (2008). *Comparison of the Efficiency depending on test standards of Three-Phase Cage Induction Machines*. IEEE Publication, Electrical Machines, 2008, ICEM 2008, 18th International Conference.
- [12] M. Aoukadi, A. Binder. Department of Electrical Energy Conversion, Darmstadt University of Technology. Darmstadt, Germany. (Mar.2008). *Evaluation of Different Measures Methods to Determine Stray Load Losses in Induction Machines*. IEEE Publication, IEEE Industrial Electronic Magazine.
- [13] Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino, Luca Ferraris, Mario Lazzari. Politecnico di Torino. Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Italy. (Jul.2010). *Impact of Supply Voltage on Stray Load Losses in Induction Motors*. IEEE Publication, Industry Applications, IEEE Transactions.
- [14] Emmanuel B. Agamloh. Advance Energy Corporation, Raleigh, North Carolina. (Nov.2010). *An Evaluation of Induction Machine Stray Load Loss from Collated Test Results*. IEEE Publication, Industrial Applications, IEEE Transactions.
- [15] Wenping Cao. University of Teesside, Tees Valley, U.K. (Sep.2009). *Comparison of IEEE 112 and New IEC Standard 60034-2-1*. IEEE Publication, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 24, No 3, September 2009.
- [16] Enrique Quispe, Rosaura Castrillón. Energy Research Group, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia. Julio Gómez, Percy Viego. Energy and Environment Studies Center, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba. *Comparison of Four Efficiency Estimation Methods of In-Service Induction Motors*. Proceedings of 6th International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems EEMODS'09, pp 1-6, Nantes, France, 14 to 17.Sep.2009