

# *Trabajo de Diploma*

*en opción al título de*

# *Ingeniero Eléctrico*

*Título: Valoración de la eficiencia del motor trifásico de inducción mediante las normas internacionales IEEE-112 y la IEC-60034-2-1.*

*Autor: Manuel Morales Santana.*

*Tutor: Dr.C. Ignacio Romero Rueda.*

*Moa, 2015*



## *Derechos de Autor*

Con relación al contenido de la presente tesis, el autor es responsable y certifica la propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. "Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer el uso que estime pertinente con los resultados.

Para que así conste firmamos la presente:

A los ---- días del mes de ----- del -----

-----  
Diplomante: Manuel Morales Santana.

-----  
Tutor: Dr.C. Ignacio Romero Rueda.

## *Agradecimientos*

*Agradezco a todas las personas que de una forma u otra tuvieron que ver con la realización de este trabajo:*

*A mi tutor Dr.C. Ignacio Romero Rueda que durante el periodo me ha brindado todo el apoyo y la dedicación que requería.*

*A todos los profesores que participaron en mi formación como profesional.*

*A mis padres Manuel Morales Velásquez y Reina Santana Pupo por enseñarme y darme toda la confianza y ayuda para concluir mis estudios.*

*A mi familia en general por ayudarme y brindarme todo su apoyo.*

*A mis amigos por estar en el lugar correcto.*

## *Dedicatoria*

*Dedico este Trabajo de Diploma a mi familia y profesores, quienes con responsabilidad inculcaron en mi la honradez, sencillez y valor para cumplir mis metas.*

*Muy especialmente a mis padres Manuel Morales Velásquez y Reina Santana Pupo, a quienes siempre estaré agradecido por todo el apoyo y la confianza que me han brindado, durante el transcurso de mi vida para lograr mi formación como profesional.*

*También a mis amigos y compañeros con los que he compartido estos años de estudios.*

## *Resumen*

En el presente trabajo se analizan los diferentes métodos para la determinación de la eficiencia en motores de inducción trifásicos definidos por las normas IEEE 112 y la IEC 60034-2-1. Se describe un estudio comparativo analizando la exactitud instrumental precisada en ambas normas, la metodología que utilizan, y los factores humanos. Seis motores de inducción se ensayan siguiendo las dos normas y los resultados son comparados con el objetivo de mostrar sus distinciones más significativas. Realizado este análisis comparativo se concluye que las mayores diferencias entre las normas se encuentran en los resultados de pérdidas adicionales, apoyado en estos resultados y en la bibliografía utilizada se propone un método para determinar este tipo de pérdidas.

## *Summary*

In the present work, two different methods defined by the standards IEEE 112 and IEC 60034-2-1 to determine the efficiency on three phase induction motors are analyzed. It is described a comparative study to analyzing the instrumental accuracy presented in both standards, used methodology, and human factors. Six induction motors are tested following the two norms procedure and results are compared in the goal of showing most significant distinctions. Making this comparative analysis it is concluded that the biggest differences between the norms shows in stray loss results, supported in this results and used bibliography it is proposed a method to determine this kind of loss.

# Índice

## Contenido

<i>Derechos de Autor</i> .....	I
<i>Agradecimientos</i> .....	II
<i>Dedicatoria</i> .....	III
<i>Resumen</i> .....	IV
<i>Índice</i> .....	VI
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>Capítulo 1. Marco teórico referencial de las normas IEEE 112 y IEC 60034 - 2 - 1</b> .....	6
Introducción.....	6
1.1. Eficiencia en los motores de inducción trifásicos. ....	6
1.2. Principales normas para la determinación de la eficiencia de los motores trifásicos de inducción y sus métodos establecidos. ....	7
1.2.1 Norma IEEE-112.....	7
1.2.2 Descripción general de los métodos para determinar la eficiencia según la norma IEC 60034-2-1:.....	16
Conclusiones parciales. ....	28
<b>Capítulo 2. Comparación de las normas internacionales IEEE-112 y IEC 60034-2-1</b> .....	29
Introducción:.....	29
2.1 Comparación de las metodologías IEEE 112 e IEC 60034-2-1:.....	30
2.2 Consideraciones:.....	43
Conclusiones parciales: .....	48
<b>Capítulo 3. Análisis de los resultados.</b> .....	49
Introducción.....	49
3.1 Determinación de la eficiencia mediante las normas IEEE-112 y IEC 6003-4-2-1 utilizando los métodos de entrada-salida definidos en ambas....	49
3.1.1 Resultados de eficiencia obtenidos en los ensayos realizados a los motores mencionados anteriormente. ....	52
3.1.2 Análisis de los resultados. ....	54
3.2 Valoración del método más apropiado para determinar las pérdidas adicionales, de acuerdo a los resultados. ....	56
3.3 Propuesta de vías para la determinación de la eficiencia de los motores trifásicos de inducción. ....	56
3.4 Valoración científica del trabajo.....	56
3.5 Valoración social del trabajo.....	57
Conclusiones parciales. ....	57
Conclusiones Generales .....	58
Recomendaciones.....	59
<i>Bibliografía.</i> .....	60
<i>ANEXOS</i> .....	61
	VI

## INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética se ha convertido en una preocupación mundial a partir de la crisis energética de los años 70 del siglo XX motivada, entre otros factores, por el progresivo cambio climático y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), obligando a los gobiernos a trazar políticas y regulaciones que contribuyan al mejoramiento de la eficiencia energética.

La energía eléctrica prevalece sobre otras formas de abastecimiento de energía y es esencial para el desarrollo industrial, económico y social de un país de ahí la necesidad de realizar estudios que contribuyan al uso más eficiente de la misma. Los motores eléctricos han sido considerados uno de los mayores consumidores de energía hasta nuestros días, sin embargo ha sido notable su utilización en casi todas las actividades socioeconómicas de las naciones constituyendo un elemento fundamental en la cadena productiva y un objetivo clave para el ahorro energético.

De acuerdo con estudios realizados se ha podido comprobar que entre el 40 y el 60 % del consumo total de energía eléctrica a nivel mundial corresponde a los motores trifásicos de inducción. Según el Departamento de Energía de E.U. (DOE) en ese país la energía consumida por las industrias constituyen el 70 % del total[1] y según [2] estos motores representan el 75% para la Unión Europea.

En Cuba, según la Unión Nacional Eléctrica (UNE) el consumo de electricidad facturado ascendió a 12,8 TW h en el año 2010, donde el sector estatal fue responsable del 46,8 %; y dentro de este, la industria demandó el 86,4 %, se demostró en estos resultados que los motores de inducción constituyen las causas principales del consumo de la energía total [3].

Es fundamental entonces poder desarrollar métodos que permitan conocer el consumo de energía de cada motor instalado y el de algún otro que se proponga como alternativa más eficiente. Como ya se dijo, para esto existen

diferentes métodos, algunos son más exactos pero implican la utilización de un equipamiento más caro y la realización de ensayos de relativamente larga duración.

Para lograr mejorar el rendimiento en los motores trifásicos de inducción es necesario conocer al detalle el rendimiento del mismo, de ahí que su estudio se apoya en las principales normas internacionales utilizadas para ensayos de máquinas eléctricas, son ellas la IEEE-112 [4] y más reciente la IEC60034-2-1 [5]. Estas normas establecen procedimientos que implican consideraciones en cuanto a las pérdidas, tipos de mediciones o instrumentos requeridos, valores de corrección de temperatura para las resistencias y otros.

La norma IEEE 112 ha sido ampliamente aceptada como un hito en las normas de ensayo de los motores de inducción, se ha considerado como fiable y consistente. Inicialmente fue utilizada en Estados Unidos y luego se fue generalizando de forma tal que hoy en día es usada en gran parte del mundo.

Esta provee el procedimiento de ensayo básico para la evaluación del comportamiento de un motor o generador polifásico de inducción de cualquier tamaño, cada revisión de la misma desde su introducción como norma de la IEEE en 1964 ha sido para mantener la misma al corriente con mejoras en la instrumentación, en las técnicas de ensayo, con conocimientos incrementados en el arte de las mediciones, y con el cambio constante en las necesidades y deseos de los usuarios de las máquinas y aquellos relacionados con la conservación de la energía .

En Europa, la norma de la Comisión Internacional Electromecánica (IEC) 60034-2 estuvo en uso hasta hace poco, esta fue una norma relativamente fácil de aplicar en la práctica y requirió muy poca información en la determinación de la temperatura de los devanados y las pérdidas adicionales en la carga. Como resultado, sufrió grandes errores de medición y se criticó por muchos años

[6].La nueva norma IEC 60034-2-1 [5] se publicó en noviembre de 2007 y se refinó desde su versión anterior haciendo significativa referencia en IEEE 112.

Esta constituye una guía para determinar tanto las pérdidas como la eficiencia en máquinas eléctricas rotativas exceptuando aquellas máquinas destinadas a la tracción de vehículos tal y como su título explica. El objetivo de esta norma es establecer métodos para determinar el rendimiento y las pérdidas en máquinas de CC, máquinas síncronas y máquinas de inducción.

Por lo anterior la determinación de la eficiencia de los motores trifásicos de inducción con la mayor precisión posible constituye una prioridad en el mundo actual si de ahorro de energía se habla. Sobre la base de esta realidad se establecen los elementos esenciales de la metodología de la investigación:

### **Situación Problemática**

De la revisión realizada a la bibliografía existente se ha podido constatar que ambas normas en su aplicación evidencian elementos confiables para la determinación de la eficiencia de los motores trifásicos de inducción, pero a la vez contienen insuficiencias en algunos de sus métodos que en ocasiones no permiten asegurar la precisión requerida.

### **Problema**

Las normas adoptadas en este estudio no arrojan por separado resultados confiables para la determinación de la eficiencia de los motores de inducción.

### **Objeto de estudio**

Normas para la determinación de la eficiencia de motores de inducción.

## **Objetivo general**

Establecer una comparación entre las normas internacionales IEEE 112 y la IEC 60034-2-1, a partir de una valoración cualitativa, para su aplicación en la determinación de la eficiencia de los motores de inducción.

## **Objetivos específicos**

1. Realizar una revisión de las normas IEEE 112 y la IEC 60034–2–1 para establecer los principales elementos que la integran.
2. Establecer las principales semejanzas y diferencias en la aplicación de ambas normas, para estimar la eficiencia de una máquina de inducción.
3. Valorar su aplicación en un caso concreto.

## **Campo de acción**

Evaluación de la eficiencia en motores de inducción a partir de las normas internacionales seleccionadas.

## **Hipótesis de investigación**

La utilización combinada de las normas IEEE 112 y IEC 60034 – 2 – 1, posibilita establecer un método efectivo para la determinación de la eficiencia del motor de inducción en los trabajos de eficiencia energética en Cuba.

## **Resultados esperados**

- 1 Demostrar la efectividad de ambas normas en la determinación de la eficiencia del motor de inducción.
- 2 Establecer los principales elementos que las diferencian, así como su adaptación a los trabajos de eficiencia energética.
- 3 Establecer los principales elementos que la integran y su interrelación.

- 4 Demostrar que el uso de ambas normas es fundamental como aplicación, para estimar la eficiencia de una máquina de inducción.

## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL DE LAS NORMAS IEEE 112 Y IEC 60034 - 2 -1.**

### **Introducción.**

Como es conocido, los motores trifásicos de inducción son los principales consumidores de energía eléctrica en el mundo. Desde hace unos cuantos años en muchos países se han realizado diversos estudios [4, 5, 7-9] que tienen como principal objetivo la determinación de su eficiencia, cada uno de ellos ha arrojado ventajas y limitaciones pero en esencia persiguen el objetivo de incrementar la eficiencia, optimizar el uso final de la energía eléctrica, reducir los costos y minimizar el impacto ambiental de este tipo de máquinas universalmente empleadas.

#### **1.1. Eficiencia en los motores de inducción trifásicos.**

Un motor eléctrico es una máquina que transforma la energía eléctrica en mecánica. La eficiencia o rendimiento de un motor eléctrico es una medida de su habilidad para convertir la potencia eléctrica que toma de la línea en potencia mecánica útil. No toda la energía eléctrica que un motor recibe, se convierte en energía mecánica. En el proceso de transformación, aparecen pérdidas, la cual provoca que la eficiencia nunca sea máxima (100%). Si las condiciones de operación de un motor no son las más favorables o este tiene algún desperfecto, la magnitud de las pérdidas, pueden aumentar, provocando consecuentemente la disminución de la eficiencia.

La eficiencia de un motor se define como:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} \cdot 100 \quad (\%) \quad (0.1)$$

Donde:

$P_m$ : Potencia mecánica de salida.

$P_e$ : Potencia eléctrica de entrada.

Y como:

$$P_m = P_e - P_t \quad (0.2)$$

$P_t$ : Pérdidas totales

Se tiene que:

$$\eta = \left(1 - \frac{P_t}{P_e}\right) \cdot 100 \quad (0.3)$$

Las principales normas internacionales utilizadas para ensayos de máquinas eléctricas, son la IEEE-112-2004 y la más reciente IEC 60034-2-1-2007. Estas normas establecen varios métodos de cálculo, los cuales serán tratados en el capítulo. Con la implementación de estos se obtienen resultados de eficiencia de gran exactitud, esto implica una reducción de los gastos de energía, del costo económico del país y las industrias en general.

## **1.2. Principales normas para la determinación de la eficiencia de los motores trifásicos de inducción y sus métodos establecidos.**

### **1.2.1 Norma IEEE-112.**

La norma IEEE-112-2004 establece cinco métodos denominados A, B, C, E y F con las variantes E1, F1, C/F, E/F y E1/F1.

A continuación se desarrolla el análisis teórico de estos métodos, las ecuaciones utilizadas en los mismos debido a su gran extensión se pueden encontrar en [4].

#### **Método A: Entrada-Salida.**

Este método se limita a máquinas con potencias nominales menores a 1kW. La eficiencia se calcula como la relación de la potencia de salida medida con respecto a la potencia de entrada medida, después de las correcciones de temperatura y dinamómetro, sí es aplicable.

### **Procedimiento del método.**

La máquina está cargada por medio de un freno mecánico o dinamómetro. Las lecturas de potencia eléctrica, corriente, tensión, frecuencia, deslizamiento, torque, temperatura ambiente, y temperatura en el enrollado del estator o resistencia en el enrollado del estator pueden ser obtenidas para cuatro puntos de carga aproximadamente iguales con un espacio de 25% e incluyen el 100% de la carga, y dos puntos de carga adecuadamente escogidos como los anteriores pero que no exceda el 150% de la carga, cargando la máquina desde el valor de carga más bajo hasta llegar al estado de carga más alto.

### **Formas de cálculo.**

El cálculo se desarrolla como se muestra en el **(Anexo A, Tabla 1.1)**. La corrección del dinamómetro debe hacerse, si es aplicable, en el contorno de la **tabla 1.2, Anexo A** y debe realizarse con la misma dirección de rotación que se usa durante la prueba con carga. La pérdida del estator será corregida por temperatura como se ha indicado.

En la **tabla 1.1 del anexo A** se muestra la descripción de los parámetros necesarios para la obtención de la eficiencia en el método en cuestión. La variable ( $t_t$ ) es la temperatura en el enrollado del estator determinado por la resistencia en el estator o por el detector de temperatura durante la prueba y ( $t_s$ ) es la temperatura especificada por la corrección de la resistencia.

La **Tabla 1.2 del anexo A** muestra un resumen de las características de funcionamiento para cada uno de los motores objeto de estudio, así como los estados de carga para las cuales fueron evaluadas dichas máquinas. También es utilizada por los demás métodos de laboratorio.

### **Método B: Entrada-Salida con segregación de pérdidas y medición indirecta de pérdidas adicionales con carga.**

Este método consiste en varios pasos. Todos los datos se toman cuando la máquina opera en régimen de motor, en dependencia de la región de funcionamiento para el cual se requiere el dato de eficiencia. Las pérdidas totales aparente (entrada menos salida) es segregada en varios de sus

componentes como pérdidas adicionales con carga determinada por la diferencia entre las pérdidas totales aparente y la suma de las pérdidas convencionales (Pérdidas en el estator y rotor, pérdida en el núcleo, y pérdidas por fricción y batimiento). El valor de las pérdidas adicionales con carga serán asumidas según la norma 112 de la IEEE. Los datos de pérdidas adicionales con carga son usados para calcular el valor final de las pérdidas totales y la eficiencia.

Para minimizar las diferencias en el valor de la pérdida total y el valor de la eficiencia determinada por las pruebas realizadas con diferentes medios, la exactitud de la instrumentación usada para determinar potencia eléctrica, torque, y la velocidad, llegará a ser mayor que el requerido para una prueba general en cualquiera de los otros métodos de prueba.

#### **Procedimiento del método.**

Las subpruebas que constituyen el método B son desarrolladas en el orden del listado del procedimiento de la prueba (**Ver Anexo A, Tabla 1.3**). No es necesario que las subpruebas sean desarrolladas en orden sucesivo, pueden ser realizadas individualmente si la temperatura del motor está establecida cerca de su valor nominal de operación con carga. Dentro del procedimiento se realizan pruebas de temperatura con una carga determinada, prueba bajo carga y prueba sin carga.

#### **Forma de cálculo.**

La ejecución del cálculo se hace usando la (**Tabla 1.3 Anexo A**), el mismo incluye la corrección de temperatura y la segregación de pérdida. Si las pérdidas adicionales con carga no son medidas, y es aceptada por normas aplicables o por especificación de contratos, el valor de las pérdidas adicionales con carga puede ser asumido por los valores que se muestran en la (**Tabla 1.4 Anexo A**).

#### **Método C: Máquina dobles con segregación de pérdidas y mediciones indirecta de pérdidas adicionales con carga.**

Este método de determinación de eficiencia, puede usarse cuando dos máquinas están disponibles. Las dos máquinas se acoplan juntas y conectadas

eléctricamente a dos fuentes de potencia, lo que es ajustable a la frecuencia de una de ellas.

**Como procedimiento se realizan varias pruebas, las cuales se agrupan en:**

1. **Prueba sin carga:** En esta se determinan las pérdidas en el núcleo y pérdidas por fricción y batimiento, corriente sin carga y la separación de las pérdidas del núcleo de las pérdidas por fricción y batimiento.
2. **Prueba bajo carga:** Una máquina se opera como motor a voltaje y frecuencia nominales, y la otra se opera como un generador a voltaje nominal a baja frecuencia, hasta producir la carga deseada.

Las mediciones eléctricas de potencia a la entrada y salida, temperatura en el enrollado del estator o resistencia del enrollado del estator y deslizamiento, deben ser tomadas en cada máquina.

La prueba tiene que repetirse invirtiendo el flujo de potencia. La frecuencia de la primera máquina es inalterada mientras que la de la segunda se aumenta para producir la carga deseada. La forma de colocar los instrumentos y transformadores de medición no será cambiada. Con la inversión del flujo de potencia, se deben calibrar los instrumentos, lo cual minimiza ordinariamente los errores de medición. Los errores en el ángulo de fase de los transformadores de medición son acumulativos por la prueba en régimen de motor y generador. Es importante hacer las correcciones exactas de los errores en el ángulo de fase, porque ellos harán que las pérdidas disminuyan a su valor verdadero.

#### **Forma de cálculo.**

El cálculo del motor se realiza a través de la **tabla A.1.5 (Ver anexo A)** el cual incluye la corrección de temperatura. Al igual que en el método anterior, el valor de las pérdidas adicionales con carga es asumida (**Ver tabla A.1.4**) y el valor de la corriente en el rotor,  $I_2$ , se ajusta al punto de carga en el cual las pérdidas adicionales con carga serán asumidas.

**Método E o E1: Medición de la potencia eléctrica con segregación de pérdidas.**

En este caso se hace referencia al método E o E1 porque entre ellos existe cierta relación el cual muestra que:

El Método E es la medición de la potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas y medición directa de pérdidas adicionales con carga.

Método E1 es la medición de la potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas y asume cierto valor de pérdidas adicionales con carga.

La diferencia que existe en estos métodos es que en E se mide las pérdidas adicionales con carga y en E1 se asume el valor de las pérdidas adicionales con carga; por eso se hará referencia a los dos métodos unidos.

La potencia a la entrada debe medirse por los métodos convencionales. La potencia a la salida debe determinarse substrayendo las pérdidas totales a la potencia de entrada. Las pérdidas totales son iguales a la suma de la corrección de las pérdidas reales del estator y rotor con la especificación de la corrección de la resistencia del enrollado, las pérdidas en el núcleo, pérdidas por fricción y batimiento, y pérdidas adicionales con carga.

#### **Procedimiento de la prueba.**

Al igual que el método anterior, en este se realizan varias pruebas como la prueba sin carga, donde se determinan las pérdidas en el núcleo y pérdidas por fricción y batimiento, corriente sin carga y la separación de las pérdidas del núcleo de las pérdidas por fricción y batimiento.

#### **Prueba bajo carga.**

Para obtener los datos requeridos es necesario acoplar el motor mediante una correa o directamente al eje, una carga variable. El mismo arreglo puede emplearse para la prueba de temperatura. Para cada uno de los seis puntos de carga aproximadamente iguales; las mediciones de la potencia eléctrica, corriente, voltaje, deslizamiento, temperatura ambiente, y la resistencia en el enrollado del estator o temperatura serán registradas.

La resistencia del enrollado del estator para cada estado de carga puede ser estimada comparando el aumento de temperatura por un detector de temperatura empotrado, un sensor de temperatura colocado al final del enrollado del estator, o el aumento de temperatura del exterior, en

correspondencia con el valor fijo de la medición de temperatura obtenida durante la prueba de temperatura.

Si las pérdidas adicionales con carga no son medidas, y si es aceptada por normas aplicables o por especificación de contratos, el valor de las pérdidas adicionales con carga puede ser asumidas por los valores que se muestran en la **tabla A.1.4. (Anexo A)**.

#### **Forma de cálculo.**

Este método se determina usando la **tabla A.1.6 (Ver anexo A)**, la cual incluye la corrección de la temperatura. En ella se muestra los parámetros de cálculo y los estados de carga para a los cuales fueron sometidos los motores objeto de estudio.

#### **Métodos F o F1: Circuitos equivalentes.**

Al igual que en el Método E o E1, se hace alusión al método F o F1 porque ellos están interrelacionados de forma tal que:

El Método F lleva el nombre de circuito equivalente con medición directa de las pérdidas adicionales con carga.

El Método F1 se nombra circuito equivalente asumiendo cierto valor de pérdidas adicionales con carga.

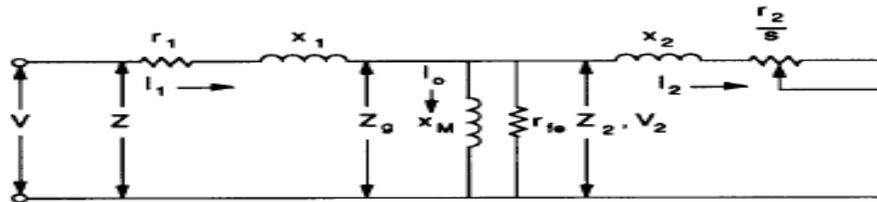
Como se puede observar la diferencia que existe está en que en el método F se realiza medición directa de las pérdidas adicionales con carga y en F1 se asumen las pérdidas adicionales con carga. Por esta razón es que se hace referencia a los dos métodos al mismo tiempo.

Cuando las pruebas bajo carga no son hechas, las características de operación (eficiencia, factor de potencia, torque, etc.) son calculadas sobre la base del circuito equivalente mostrado en la figura 1. Los parámetros de la máquina en el circuito equivalente son extraídos de los datos de la prueba registrados durante una prueba sin carga y la prueba de impedancia.

La predicción exacta de las características de la máquina, operan en el rango normal, depende principalmente de  $r_2$ , que representa la resistencia del rotor

determinado a corrientes de frecuencia baja y, por  $x_2$  que representa la reactancia de dispersión del rotor a las corrientes de frecuencia baja.

Figura 1.1. Circuito equivalente.



### Procedimiento de la prueba.

Con este método se realizan varias pruebas que lo llevan a su máxima eficiencia y calidad. Dentro de estas tenemos la prueba sin carga en la cual se determinan algunos parámetros como la corriente sin carga, pérdidas sin carga, y la separación de las pérdidas del núcleo, de las pérdidas por fricción y batimiento.

### Prueba de impedancia.

Las lecturas de tensión, corriente, potencia eléctrica de entrada, y resistencia en el estator o temperatura en el enrollado del estator son tomadas a una o más frecuencias, voltajes, y/o cargas. En estos datos están referidos los datos de impedancia. Si la máquina está siendo probada tiene rotor bobinado, el rotor será puesto en cortocircuito para la prueba.

La reactancia puede ser determinada por la corriente de la carga. Es importante que el valor de la reactancia usada en el cálculo del circuito equivalente sea el valor correcto por saturación y efecto pelicular; por otra parte, el cálculo del factor de potencia será más alto que el valor real.

Los datos de impedancia se determinarán por uno de los métodos siguientes:

**Método 1:** Prueba de impedancia a rotor bloqueado en una máquina trifásica a un máximo de 25% de la frecuencia y corriente normada.

**Método 2:** La prueba de impedancia a rotor bloqueado en una máquina trifásica a frecuencia normada, será aproximadamente a un 50% de la frecuencia normada, y a un máximo de 25% de frecuencia, todos a la corriente normada. Las curvas serán desarrolladas en tres puntos de prueba y usan los valores determinados de reactancia total y resistencia del rotor a la frecuencia requerida.

**Método 3:** Una prueba de impedancia por encima de la velocidad del punto de ruptura a la velocidad de deslizamiento aproximado a la frecuencia deseada reducida del rotor. En este método, el motor es puesto en marcha acoplado o no a una carga reducida y el voltaje es reducido para dar aproximadamente el punto de deslizamiento a plena carga. El deslizamiento se determinará cuidadosamente.

**Método 4:** Cuando ninguno de los métodos anteriores es utilizado, puede emplearse la prueba de impedancia a rotor bloqueado en una máquina trifásica a voltaje reducido y frecuencia normada lo que resulta aproximadamente la corriente normada y una prueba bajo carga.

Para el método F o F1, las pérdidas adicionales con carga serán asumidas igual que en los métodos anteriores, estas son dadas en porciento de la potencia nominal de salida, (ver tabla A.1.4 .Anexo A).

#### **Forma de cálculo. Método F1.**

Una de las formas de obtener los parámetros del circuito equivalente es aplicando el método F1 de la IEEE Std. 112, para el cual se requiere realizar pruebas de impedancia, pruebas sin carga y con voltaje variable. En esta prueba es necesario tomar datos de voltaje, potencia, corriente, temperatura en el devanado del estator o la resistencia del devanado del estator, además del deslizamiento.

Las mediciones se deben realizar a dos valores de voltaje, mientras el motor funciona en vacío. Una vez que se realizan las mediciones, se calculan los parámetros del circuito equivalente mediante procesos iterativos, para lo cual

es necesario contar con el dato de la relación de diseño de  $X_1/X_2$  o, en su defecto, usar los valores de diseño establecidos en la norma NEMA MG1-1993. Así, la prueba en vacío proporciona los datos necesarios para determinar la reactancia de magnetización y la resistencia asociada con las pérdidas en el núcleo y pérdidas por fricción y batimiento.

Por otro lado, una prueba de rotor bloqueado a baja frecuencia proporciona los datos para determinar las resistencias y reactancias del estator y el rotor. En estas pruebas el deslizamiento es un parámetro muy importante a tener en cuenta.

### **Método de prueba C/F, E/F, o E1/F1. Circuito equivalente calibrado para un punto de prueba.**

Cuando un punto de la corriente de deslizamiento bajo carga con una temperatura  $t_t$  del devanado del estator está disponible, el método F o F1 puede ser usado para determinar las características de la máquina a otras cargas. En tales casos,  $r_2$  no es determinado por la prueba de impedancia a baja frecuencia. Se usa el siguiente procedimiento:

Se usa la tabla **A.1.7 (Ver anexo)** pero comienza en la línea 2 con un valor asumido de  $r_2/S$  para el punto de la carga de prueba y el valor de  $r_1$  está basado en el valor de la temperatura del devanado del estator en  $t_1$ . Después de llegar a la línea 21, revisar el valor calculado de la corriente de entrada y la potencia de entrada contra los valores medidos de la corriente de entrada y de la potencia de entrada.

Ajuste  $r_2/S$  y  $X_m$ , e insista hasta que el valor calculado de la potencia de entrada y de la corriente de entrada esté en concordancia con el valor medido de la corriente de entrada y la potencia de entrada dentro de 1%. Los otros parámetros de corriente no deben ser ajustados (la potencia está básicamente una función de  $r_2/S$ ).

Obtenga  $r_2$  por la multiplicación del valor asumido final de  $r_2/S$  por el valor medido de deslizamiento en ( $p_u$ ) de la velocidad sincrónica. Este procedimiento

establece el valor de  $r_2$  (sin la corrección de la temperatura) que se usará en el cálculo del rendimiento de la carga.

Corrige  $r_1$  y  $r_2$  a la temperatura especificada,  $t_s$ , en concordancia con la temperatura especificada **Ver tabla A.1.8 (Anexo A)** y determine el en puntos deseados de carga siguiendo el formato de la **tabla A.1.7**.

#### **Forma de cálculo.**

Para este caso se usará la tabla **A.1.7 (Ver Anexo A)** en la cual se realiza el método F, F1, C/F, E/F y E/F1 (solución del circuito equivalente). En esta tabla se muestran todos los parámetros de cálculo así como los estados de carga a la cual serán sometidos los motores objetos de análisis.

#### **1.2.2 Descripción general de los métodos para determinar la eficiencia según la norma IEC 60034-2-1:**

1. Método directo con medida del par designado por la norma como preferente en potencias inferiores a 1 kW.
2. Suma de pérdidas con medida del par, designado por la norma como preferente en potencias comprendidas entre 1 kW y 150 kW.
3. Suma de pérdidas sin medidas del par con las pérdidas adicionales en carga asignadas.
4. Métodos de obtención de las pérdidas adicionales.

En la aplicación de todos los métodos anteriores, la norma especifica las necesidades siguientes por lo que a precisión de las medidas se refieren:

Precisión de los aparatos de medida: 0,2%.

Precisión en las medidas de par: 0,2% (debe corregirse la medida del dinamómetro, si es necesario).

Precisión en las medidas de frecuencia: 0,1%.

Precisión en las medidas de resistencia: 0,2%.

Precisión en las medidas de velocidad: 0,1% o 1 rpm.

Para determinar la temperatura de funcionamiento a la que debe referirse la resistencia, debe usarse alguno de los métodos siguientes (por orden de preferencia):

Temperatura determinada en el ensayo de resistencia a plena carga (norma IEC60034-1).

Asumiendo la temperatura según la clase de aislamiento (Clase B = 95 °C, Clase F = 115 °C, Clase H = 135 °C)

Tabla 1.1: Métodos para la determinación del rendimiento, según IEC60034-2-1.

<b>Métodos</b>	<b>Necesidad Básica</b>
<b>Métodos directos:</b>	
Medida directa del par	Freno y medidor de par hasta plena carga
Máquina calibrada	Otra máquina calibrada
Doble alimentación	Dos máquinas idénticas
<b>Métodos de las pérdidas totales:</b>	
Método calorimétrico	Envoltura térmica específica
Simple alimentación	Dos máquinas idénticas, de rotor bobinado
<b>Suma de pérdidas, con medida del par:</b>	
Pérdidas adicionales en carga a partir de la separación de pérdidas	Freno y medidor de par hasta un 25% superior a plena carga
<b>Suma de pérdidas, sin medida del par:</b>	
Pérdidas adicionales en carga asignada	Medidor de potencia
Rotor desmontado y ensayo de rotación inversa	Motor auxiliar, de potencia inferior a 5 veces las pérdidas del motor a ensayar
Eh-star	Resistencia para una corriente un 50% superior a la de plena carga
Circuito equivalente	Sistema de bloqueo del rotor

### Método directo con medida del par.

1. La potencia eléctrica absorbida ( $P_{ab}$ ).
2. El par de salida (T) y la velocidad ( $n$ )

Se calculan directamente la potencia útil ( $P_u$ ) y el rendimiento ( $\eta$ ):

$$P_u = T\Omega \quad (0.4)$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}} \quad (0.5)$$

Siendo  $\Omega$  la velocidad en rad/s.

### Suma de pérdidas con medida del par.

Debe procederse según los apartados 1, 2 y 3 indicados a continuación.

1. Determinación de las pérdidas constantes ( $P_{const}$ ).

Engloban las pérdidas en el hierro ( $P_{fe}$ ) y las pérdidas por rozamientos + ventilación ( $P_{fw}$ ). Se obtienen mediante ensayo de vacío, realizado a tensión y a frecuencia nominal. Se calculan a partir de:

$$P_{const} = P_{totales.vacío} - P_{eléctrica.vacío} \quad (0.6)$$

Con:

$$P_{eléctrica.vacío} = 3I_{fase.vacío}^2 R_{fase} \quad (0.7)$$

$P_{totales.vacío}$  = potencia total demandada en el ensayo de vacío.

$I_{fase.vacío}$  = corriente de fase en el ensayo de vacío.

$R_{fase}$  = resistencia de fase a la temperatura del ensayo de vacío.

2. Determinación de las pérdidas en el hierro ( $P_{fe}$ ) y de las pérdidas por rozamientos + ventilación ( $P_{fw}$ ).

Se obtienen a partir del ensayo de vacío como mínimo a siete tensiones diferentes, incluida la tensión nominal. Se calculan las pérdidas por rozamientos + ventilación ( $P_{fw}$ ), si se representa en una gráfica las pérdidas constantes en función de la tensión aplicada en el ensayo de vacío al

cuadrado ( $U_{vacío}^2$ ). Las pérdidas buscadas corresponden al punto de corte con el eje de coordenadas de la recta de regresión que se obtiene **figura A.1.1 (Anexo A)**.

Para el cálculo de las pérdidas en el hierro debe representarse en primer lugar, a partir del ensayo de vacío, las pérdidas obtenidas ( $P_{fe} = P_{ctn} - P_{freg}$ ) en función de la tensión aplicada ( $U_{vacío}$ ) (figura A.1.2 Anexo A).

Las pérdidas en el hierro, para los diferentes puntos de carga, se obtienen a partir del cálculo de la tensión  $U_r$  utilizando la ecuación (1.8), donde los valores de tensión, corriente, resistencia y ángulo son los correspondientes al punto de carga en cuestión. Entrando en la **Figura 1.2 (Anexo A)** por el valor de  $U_r$  se obtienen las correspondientes pérdidas en el hierro para el punto de carga.

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sen \varphi\right)^2} \quad (0.8)$$

### 3. Determinación de las pérdidas en carga.

Se obtienen a partir del ensayo en carga, con seis valores de carga diferente, incluida la carga nominal. Durante el ensayo, la temperatura debe ser próxima a la temperatura de referencia del motor. Se calculan las pérdidas Joule en el estator ( $P_{eléc1}$ ) a partir de:

$$P_{eléc1} = 3R_{fase} \cdot I_f^2 \quad (0.9)$$

Siendo  $R$  fase la resistencia de fase a la temperatura de cada punto del ensayo e  $I_f$  la corriente de fase en cada punto.

Las pérdidas Joule en el rotor ( $P_{j2}$ ) se calculan a partir de:

$$P_{j2} = (P_{ab} - P_{j1} - P_{fe}) \cdot s \quad (0.10)$$

Siendo  $P_{ab}$  la potencia absorbida y  $s$  el deslizamiento para cada punto del ensayo. El deslizamiento debe corregirse a la temperatura del ensayo.

### 4. Determinación de las pérdidas adicionales en carga.

Se calculan a partir del ensayo en carga, con la medida del par en cada uno de los puntos del ensayo. Una vez determinadas las pérdidas conocidas en cada punto, se determinan las pérdidas residuales ( $P_{res}$ ) a partir de la siguiente ecuación:

$$P_{res} = P_{ab} - P_{útil} - P_{j1} - P_{j2} - P_{fe} - P_{freg} \quad (0.11)$$

Se representan las pérdidas residuales gráficamente en función del cuadrado del par. La pendiente de la regresión lineal obtenida ( $A$ ), tal como se indica en la **(figura A.1.3 Anexo A)**, será el parámetro a utilizar en el cálculo de las pérdidas adicionales en carga a partir de (0.10), donde  $T$  es el par del punto de carga a calcular.

$$P_{ad} = A \cdot T^2 \quad (0.12)$$

Finalmente, el rendimiento se calcula a partir de la ecuación (1.10)

$$n = \frac{P_{ab} - P_{pérdidas}}{P_{ab}} \quad (0.13)$$

Donde:

$P_{ab}$ = potencia absorbida.

Pérdidas= pérdidas totales ( $P_{j1} + P_{j2} + P_{fe} + P_{freg} + P_{ad}$ )

### **Suma de pérdidas sin medida del par.**

Este método resulta apropiado cuando podemos realizar el ensayo en carga pero no disponemos de medidor de par. Se calculan las pérdidas Joule en el hierro y las mecánicas igual que en el caso anterior.

Se determinan las pérdidas adicionales a plena carga en porcentaje respecto de la potencia absorbida, según las relaciones indicadas en la tabla.1.2, donde:

$P_{ab}$ = potencia absorbida

$P_u$ = potencia útil

$P_{ad}$  = pérdidas adicionales a plena carga.

La corrección de estas pérdidas adicionales para puntos de carga diferentes del nominal ( $P_{ad}'$ ), se realiza a partir de la ecuación (0.11).

$$P'_{ad} = P_{ad} \frac{I_1^2 - I_0^2}{I_{1n}^2 - I_0^2} \quad (0.14)$$

Con:

$I_1$  = corriente absorbida en el punto de carga.

$I_{1n}$  = corriente absorbida en condiciones nominales.

$I_0$  = corriente absorbida en vacío.

Una vez determinadas todas las pérdidas, el rendimiento se calcula a partir de la ecuación (0.10), como en el método descrito anteriormente.

### **Métodos de obtención de las pérdidas adicionales.**

- 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 del ensayo Eh-star.

### **Determinación a partir de una prueba de carga con medición de torque (Pérdidas residuales):**

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.

#### **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.

$$P_{res} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fv} \quad (0.15)$$

## Cálculo

Estas pérdidas adicionales son representadas como una función del torque al cuadrado, como se observa en **Anexo A (Figura A.1.4)**, y con estos valores se realiza un análisis de regresión, bajo la expresión:

$$P_{rs} = AT + B \quad (0.16)$$

Una vez determinado 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 o en las lecturas instrumentos de prueba, o ambas.

Si este caso llega 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:

$$P_{ad} = A \cdot T^2 \quad (0.17)$$

### **Determinación a partir de una prueba de rotor removido y una prueba de rotación inversa.**

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.

### **Procedimiento**

En ambas pruebas el motor se alimenta con un sistema de tensiones trifásicas balanceadas y de frecuencia igual a la frecuencia nominal del motor. Durante el ensayo se aplican cuatro valores diferentes 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  $I_R$  se calcula así:

$$I_R = \sqrt{I^2 - I_0^2} \quad (0.18)$$

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 platillos 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  $P_{1rm}$ , y temperatura del devanado estator  $\theta_{rm}$ ; luego se calculan los valores de corriente del rotor  $L_{r\ rm}$  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:

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  $P_{0rr}$  suministrada por el motor auxiliar.

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  $P_{1rr}$  y temperatura del devanado estator  $\theta_{wrm}$  del motor en prueba, y también la potencia suministrada por el motor auxiliar  $P_{Drr}$ . Se calculan entonces los valores de corriente del rotor  $I_{Rrr}$  resistencia del estator  $R_{rr}$ .

**Calculo:** El cálculo se desarrolla como se muestra en [5].

### Determinación por un ajuste asignado.

Este método consiste en asignar un valor a las pérdidas adicionales en carga  $P_{ad}$  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 mostrada en el **(Anexo A) Figura 1.5**. 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:

Tabla.1.2: Valores asumidos de las pérdidas adicionales  $P_{ad}$  en la norma.

Rango de potencia de salida nominal	Pérdidas en % de la potencia de entrada
$P_n \leq 1 \text{ kW}$	$p_{ad} = 2,5\% P_{ent}$
$1 \text{ kW} < P_n < 10 \text{ 000 kW}$	$p_{ad} = [2,5\% - 0,5\% \log_{10} P_n] P_{ent}$
$P_n \geq 10 \text{ 000 kW}$	$p_{ad} = 0,5\% P_{ent}$

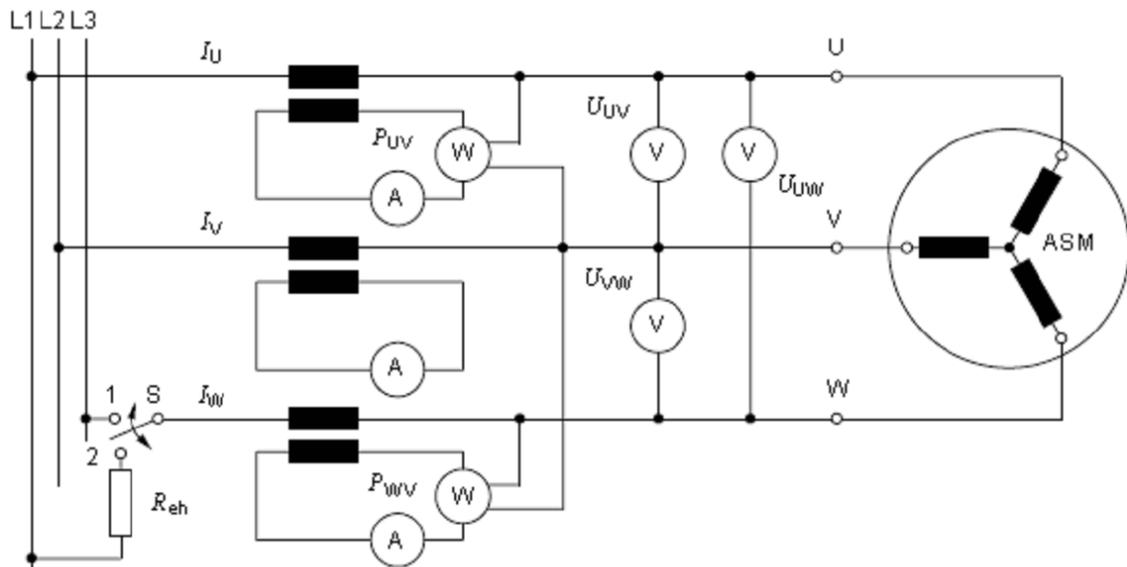
*Fuente:[5]*

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.

### Determinación a partir del ensayo Eh-star.

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 1.2:

Figura 1.2. Diagrama del montaje para la prueba Eh-star.



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.

### 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:

$$R_{eh} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} \quad (0.19)$$

Para motores con conexión nominal en estrella,

O igual a:

$$R_{eh} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{I_N} \cdot 0.2 \quad (0.20)$$

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:

$$I_t = \sqrt{I_N^2 - I_0^2} \quad (0.21)$$

Y para motores con conexión nominal en delta:

$$I_t = \frac{\sqrt{I_N^2 - I_0^2}}{\sqrt{3}} \quad (0.22)$$

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

$$U_t = U_n \quad (0.23)$$

Y para motores con conexión nominal en delta:

$$U_N = U_n \cdot \sqrt{3} \quad (0.24)$$

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  $I_u$ ,  $I_v$ ,  $I_w$ ,  $U_{uv}$ ,  $U_{vw}$ ,  $U_{wu}$ ,  $P_{uv}$ ,  $P_{vw}$ ,  $n$ .

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.

### **Cálculo**

El cálculo se desarrolla como se muestra en [5] .

### **Conclusiones parciales.**

Se realizó un análisis teórico de los principales métodos que utilizan ambas normas: tablas, figuras, ecuaciones, entre otros aspectos se muestran en el capítulo lo que permitió la valoración de la utilidad de ambas normas para el estudio de los motores trifásicos de inducción.

## **CAPÍTULO 2. COMPARACIÓN DE LAS NORMAS INTERNACIONALES IEEE-112 Y IEC 60034-2-1.**

### **Introducción:**

Las normas de ensayo de motores de inducción varían significativamente en sus metodologías definidas, exactitud instrumental, y procedimientos de ensayo. A veces, los valores de eficiencia para el mismo motor pueden diferir en un 5% con diferentes normas[10]. Incluso aunque se use la misma norma en los ensayos experimentales, la eficiencia de la máquina puede variar aún por más de un 2% cuando se realice en un sitio de ensayo diferente [11]. Aunque algunos autores sugieran trabajar hacia una norma mundial uniforme para los ensayos en los motores de inducción[8, 12], esto está lejos de ser una tarea fácil. Las dificultades se deben parcialmente a diversos errores de las fuentes de medición y la carencia de técnicas de estimación de errores exactas.

Las normas IEEE 112 y IEC 60034-2-1 son ampliamente las más utilizadas en ensayos de los motores de inducción, ambas establecen procedimientos muy efectivos para la determinación de la eficiencia de estas máquinas. Este capítulo describe un estudio comparativo entre las normas de ensayo de motores de inducción IEEE 112 y la recientemente publicada IEC 60034-2-1, primeramente usada en Estados Unidos y Europa, respectivamente. IEC 60034-2-1 ha sido refinada desde su versión anterior IEC 60034-2, con referencias a la IEEE 112.

Para comparar las dos normas, se realiza un análisis sobre la exactitud instrumental definida en ambas, la metodología que utilizan, y los factores humanos.

### **Exactitud instrumental**

Sin duda, la exactitud de la instrumentación juega un papel clave en una medición experimental. En la tabla 2.1 se muestran las exactitudes de las instrumentaciones que se especifican en las dos normas. Puede verse que la

nueva norma IEC define casi la misma exactitud instrumental que la contraparte IEEE.

Tabla 2.1: Exactitud instrumental y Estimación de la eficiencia en por ciento.

Variable	IEEE 112	IEC 34-2-1
Instrumento transformador	0.5	0.3
Voltaje	0.2	0.2
Corriente	0.2	0.2
Potencia	0.2	0.2
Torque	0.2	0.2
Velocidad	1 rpm	1 rpm
Frecuencia	0.1	0.1
Resistencia	0.2	0.2
Temperatura	1 °C	1 °C

## 2.1 Comparación de las metodologías IEEE 112 e IEC 60034-2-1:

Tabla 2.2: Secuencia de las pruebas.

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<p>Se establece un orden específico para la ejecución de las pruebas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Medición de la resistencia de los devanados del estator en frío.</li> <li>• Prueba de calentamiento con carga nominal.</li> <li>• Prueba bajo carga.</li> <li>• Prueba sin carga (ó de vacío).</li> </ul>	<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"> <li>• Prueba sin carga (ó de vacío).</li> <li>• Prueba de calentamiento con carga nominal.</li> <li>• Prueba de determinación de curva de carga.</li> <li>• Medición de la resistencia de los devanados del estator.</li> </ul>

Tabla 2.3: Medición de la resistencia de los devanados en frío.

<b>IEEE 112 - Método B</b>	<b>IEC 60034-2-1</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se mide la resistencia de los devanados a temperatura ambiente y se registran los valores de resistencia y de temperatura ambiente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Explícitamente no establece la medición en frío. Solamente hace referencia a la medición de la resistencia al final de la prueba de calentamiento</li> <li>• Establece que la resistencia se debe referir a una temperatura estándar del medio ambiente de 25 °C.</li> </ul>

Tabla 2.4: Prueba de calentamiento con carga nominal.

<b>IEEE 112 - Método B</b>	<b>IEC 60034-2-1</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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.</li> <li>• La temperatura especificada se determina por el incremento de temperatura durante esta prueba, más 25 °C.</li> <li>• 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.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con respecto a esta prueba hay diferencia básica: Esta norma no tiene en cuenta corrección por altura sobre el nivel del mar.</li> </ul>

Tabla 2.5: Prueba bajo carga.

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<ul style="list-style-type: none"> <li>• El motor se carga con potencia variable y se mide el valor con la ayuda de un dinamómetro. La temperatura del devanado debe estar dentro un rango de <math>\pm 10</math> °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.</li> <li>• Se toman medidas en seis condiciones de carga comenzando en 150% y terminando en 25% de la carga nominal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La temperatura del devanado debe estar dentro de un rango de <math>(\pm 5</math> °C) alrededor de la temperatura más alta registrada durante la prueba de calentamiento con carga nominal.</li> <li>• 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.</li> </ul>

Tabla 2.6: Prueba sin carga.

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se realiza la prueba comenzando con 125% de la tensión nominal y disminuye su valor hasta que una disminución adicional de la tensión produzca un incremento en la corriente.</li> <li>• 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 establezca el valor de la potencia de entrada (que las lecturas no varíen más de 3% entre dos mediciones hechas con intervalos de 30 minutos).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay diferencias esenciales con respecto a la norma IEEE 112.</li> <li>• Lo único adicional que menciona es la 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.</li> </ul>

Tabla 2.7: Cálculo de las pérdidas de fricción y ventilación

<b>IEEE 112 - Método B</b>	<b>IEC 60034-2-1</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>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 <math>I^2R</math> (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 fricción y ventilación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No hay diferencia.</li> </ul>

Tabla 2.8: Cálculo de pérdidas en el núcleo.

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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 <math>I^2R</math> (a temperatura de prueba) y las pérdidas por fricción y ventilación determinadas en el punto anterior.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Especifica que deben determinarse valores de pérdidas en el núcleo para voltajes entre el 60% y el 125% del nominal.</li> <li>• La norma IEEE 112 no precisa nada al respecto.</li> <li>• 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 (<math>U_r</math>), se leen los valores de pérdidas del hierro en la curva de la característica de vacío.</li> </ul>

Tabla 2.9: Cálculo de pérdidas  $I^2R$  en el estator.

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La resistencia R con la cual se calculan estas pérdidas, se obtiene con la ecuación de variación de la resistencia en función de la temperatura,</li> <li>• <math>R/R_{TR} = (t_A + k) / (t_{TR} + k)</math></li> </ul> <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>R_{TR}</math> y <math>t_{TR}</math> son los valores de la resistencia y la temperatura al momento del corte en la prueba de calentamiento con carga nominal,</li> <li>• <math>t_A</math> es el valor de temperatura para cada condición en la prueba de carga y se calcula así:</li> <li>• <math>t_A = (t_{TR} / t_{TTD}) * t</math></li> </ul> <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>t_{TTD}</math> es la temperatura al momento del corte en la prueba de calentamiento con carga nominal, medida con un detector embebido,</li> <li>• <math>t_t</math> es la temperatura medida en cada condición de la prueba de carga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se calcula inicialmente un valor no corregido de pérdidas para cada condición de carga:</li> <li>• <math>P = 1,5 * I^2R</math></li> </ul> <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• R es la resistencia medida en la prueba de calentamiento con carga nominal.</li> <li>• Posteriormente este valor de pérdidas se corrige a la temperatura de referencia (25 °C).</li> </ul>

Tabla 2.10: Cálculo de pérdidas  $I^2R$  en el rotor.

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Este valor se calcula mediante la expresión:</li> <li>• <math>Pr = (P1 - Ps - Pfe) * s</math></li> </ul> <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• P1 es la potencia de entrada.</li> <li>• Ps es el valor de las pérdidas <math>I^2R</math> en el estator.</li> <li>• Pfe es el valor de las pérdidas en el núcleo.</li> <li>• s es el deslizamiento.</li> <li>• En este cálculo las pérdidas en el devanado del estator son las calculadas a temperatura de prueba.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay diferencia, el cálculo se hace de la misma manera.</li> </ul>

Tabla 2.11: Cálculo de las pérdidas totales aparentes.

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No tiene explícito este concepto.</li> </ul>

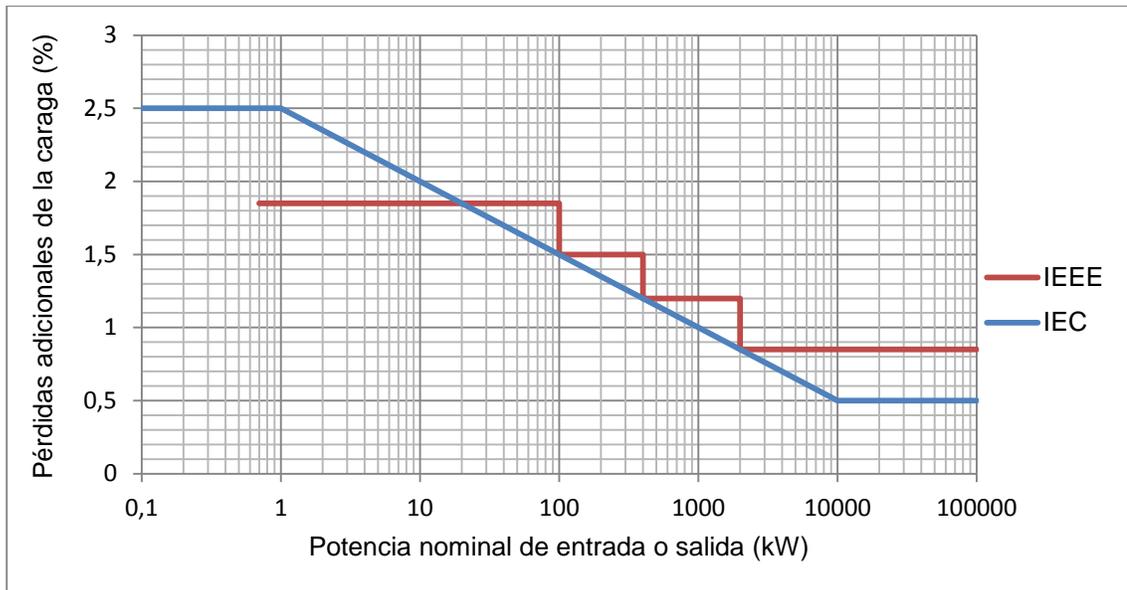
Tabla 2.12: Determinación de las pérdidas adicionales en carga.

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para cada condición de operación con carga se hace la suma de las pérdidas <math>I^2R</math> del estator a la temperatura de prueba, las pérdidas en el núcleo, las pérdidas por fricción y ventilación y las pérdidas <math>I^2R</math> 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.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay diferencia</li> </ul>

Tabla 2.13: Homogenización de las pérdidas adicionales en carga.

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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.</li> </ul>

Figura. 2.1: Pérdidas adicionales con la carga según la IEEE y la IEC.



En caso de que una determinación directa de las pérdidas adicionales de la carga no sea factible, este componente de las pérdidas se puede estimar por ambas normas usando las pérdidas adicionales con carga dadas que están en función tanto de potencia de entrada (IEC 60034-2-1) como de la potencia de salida (IEEE-112). Estas proporciones son graficadas en la Figura 2.1 para la comparación, aunque estas tienen implicaciones estadísticas para las pérdidas adicionales de la carga y ya son mejores que las arregladas, como se define en IEC 60034-2-1, estas no reflejan el diseño y construcción de un motor individual. Por su naturaleza, las pérdidas adicionales de la carga son de hecho específicas de la máquina y cualquier asignación arbitraria para esta pérdida es injustificable cuando se pueden hacer las mediciones[13].

Tabla 2.14: Corrección de las pérdidas adicionales en carga.

<b>IEEE 112 - Método B</b>	<b>IEC 60034-2-1</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay diferencia en este aspecto.</li> </ul>

Tabla 2.15: Corrección por temperatura de las pérdidas  $I^2R$  del estator.

<b>IEEE 112 - Método B</b>	<b>IEC 60034-2-1</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las pérdidas <math>I^2R</math> 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).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para la corrección de los valores de resistencia se toma como referencia la temperatura del medio ambiente como igual a 25 °C.</li> </ul>

Tabla 2.16: Corrección por temperatura de las pérdidas I<sup>2</sup>R del rotor.

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<ul style="list-style-type: none"> <li>• El valor de estas pérdidas se corrige con base en la ecuación:</li> <li>• <math>P_{r\theta} = (P_1 - P_{s\theta} - P_{fe}) * s_{\theta}</math></li> </ul> <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>P_{r\theta}</math>: es el valor de corregido para la temperatura de la prueba en carga.</li> <li>• <math>P_{s\theta}</math>: es el valor de las pérdidas en el devanado del estator ya corregido.</li> <li>• <math>P_{fe}</math>: es el valor de las pérdidas en el hierro a las condiciones de tensión de alimentación y temperatura registradas durante la prueba en carga.</li> <li>• <math>s_{\theta}</math>: es el valor de deslizamiento corregido con la misma expresión utilizada para la corrección de la resistencia del devanado del estator.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay diferencia. Se calcula exactamente igual.</li> </ul>

Tabla 2.17: Pérdidas totales corregidas.

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<ul style="list-style-type: none"> <li>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 carga, las pérdidas <math>I^2R</math> del estator y las pérdidas <math>I^2R</math> del rotor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No hay diferencia.</li> </ul>

Tabla 2.18: Cálculo de la eficiencia.

IEEE 112 - Método B	IEC 60034-2-1
<ul style="list-style-type: none"> <li>Finalmente la eficiencia se calcula con base en la expresión:</li> <li><math>E_{ff} = (\text{Potencia de entrada} - \text{Perdidas totales corregidas}) / (\text{Potencia de entrada})</math>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No hay diferencia.</li> </ul>

## 2.2 Consideraciones:

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.

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.

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.

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.

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. Sin embargo, 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.

### **2.3 Factores humanos:**

Los errores humanos surgen desde la interpretación de la norma y los procedimientos del ensayo, emprendimiento de las mediciones parciales, y el procesamiento de los resultados medidos. Por ejemplo, el error de medición cuando el instrumento no se usa apropiadamente se atribuye a los errores humanos.

Sin embargo, definir una norma de ensayo podría ser relativamente sencillo si todo el que estuviera usando exactamente el mismo equipamiento de medición tuviera el mismo ensayo básico de aparejo y capacidad de la fuente, relativo a los ensayos en motores. Desafortunadamente, este no es el caso del mundo real y se convierte en imposible definir totalmente un procedimiento de ensayo dentro de una norma aunque, por supuesto, las definiciones de procedimientos se hacen tan estrictas como sea posible.

Desde las definiciones de procedimientos de ambas normas, hay varias cuestiones que pueden apreciarse:

Primero, para muchos motores de inducción nominados por debajo de los 150 kW, las pérdidas por efecto joule en el estator son probablemente las mayores en la componente de las pérdidas. Es evidente cuán importante es determinar la resistencia de los devanados del estator, con precisión bajo cualquier condición. Sin embargo, el modo en que la norma IEC predice las resistencias de los devanados del estator está abierto a interferencias humanas en el proceso de ensayo.

Por una parte, tomar una medición muy rápidamente en cada cambio de carga puede llevar a errores si el transitorio no tuvo tiempo suficiente de estabilizarse. Por otra, tomar una medición muy lentamente en cada cambio de carga podría alterar la condición operacional que se fija a la carga nominal. En este aspecto, IEEE 112 proporciona un método relativamente exacto para determinar la

resistencia de los devanados del estator usando sensores de temperatura para obtener las temperaturas de los devanados totales.

Segundo, la localización de los sensores insertados en la máquina trae desviaciones sustanciales, particularmente cuando la máquina está experimentando un alto cambio en la temperatura nominal. En general, la diferencia de temperatura entre los conductores terminales, las ranuras del estator, y las láminas del núcleo pueden exceder fácilmente los 5°C. De hecho, la norma IEEE 112 es ya mejor que la contraparte IEC ya que la primera al menos sugiere la obtención de la mayor temperatura para los devanados del estator mientras que no se da ningún detalle en la segunda.

No obstante, el método de la IEEE puede dar solo una aproximación de la resistencia de los devanados pero no una precisa. En esencia, el dinamismo técnico de la máquina es complejo así como los cambios en la temperatura nominal son significativamente distintos en diferentes ubicaciones relativas a los caminos del flujo de aire. Sería exacto instalar varios sensores en varias partes de los devanados del estator para un valor medio, o en última instancia, usar un sistema de medición de resistencia directo en línea [14, 15].

Tercero, el número de puntos de carga o voltaje realizado en este ensayo por la norma IEEE está también abierto a interpretaciones humanas. Aunque la norma IEC especifica seis puntos aproximadamente igualmente espaciados entre el 20% y el 150%, los resultados del ensayo son de hecho graficadas contra el cuadrado del torque nominal deduciendo las pérdidas adicionales de la carga. Es obvio que los puntos de mayor carga podrían acarrear un mayor factor de ponderación sobre los de menor carga cuando se extrapole una línea a cero torque, debido a los efectos de agrandamiento por la función al cuadrado. Un caso similar ocurre para el ensayo de vacío en especificación a los puntos de voltaje tal que para determinar las pérdidas por fricción y devanados por una técnica lineal de regresión.

Mayores similitudes y diferencias de IEEE 112 e IEC 60034-2-1 se resumen en la tabla 2.2.

Tabla 2.19: Lista de elementos de IEEE 112 e IEC 60034-2-1.

Elementos	IEEE 112-B	IEC 34-2-1
Segregación de pérdidas	√	√
Sensor de temperatura posicionado	√	X
Referencia de temperatura ambiente	25°C	25°C
Resistencia de los devanados del estator corregidas	√	√
Deslizamiento corregido	√	√
Pérdidas del núcleo con caída de voltaje compensada	X	√
Análisis de la regresión lineal de las pérdidas en adicionales de la carga	√	√
Coefficiente de correlación de las pérdidas adicionales de la carga	0.9	0.95
Medidor del torque corregido	√	X
Dinamómetro corregido	X	√
Salida de potencia corregida	√	√

Donde:

√: Elementos que la integran.

X: Ausencia de elementos.

### **Conclusiones parciales:**

Se realizó un estudio comparativo de las normas IEEE-112 e IEC-60034-2-1 donde se considera la instrumentación usada, los métodos establecidos en ellas y las intervenciones humanas a la hora de aplicarlos. Esta comparación permitió conocer sus principales semejanzas y diferencias, igualmente sirvió para verificar la exactitud instrumental de la nueva norma IEC-60034-2-1,. En este capítulo también se muestra el orden a seguir al aplicar la metodología definida en ambas normas.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

### Introducción.

En la actualidad es fundamental desarrollar procedimientos que permitan conocer la eficiencia de los motores eléctricos, para esto existen diferentes metodologías algunas más exactas que otras pero que en su finalidad persiguen un mismo objetivo. En este capítulo se efectúa un análisis de los resultados arrojados por el ejemplo mostrado a continuación [7] donde se determina la eficiencia de los motores de inducción mediante las normas IEEE 112 y IEC 60034-2-1. Seguido de este análisis se hace una propuesta para la determinación de la eficiencia de los motores trifásicos de inducción, una valoración social y científica del presente estudio.

### 3.1 Determinación de la eficiencia mediante las normas IEEE-112 y IEC 6003-4-2-1 utilizando los métodos de entrada-salida definidos en ambas.

Seis motores de inducción nominados en 5.5, 11, 45, 90, 132, y 150 kW se ensayan cuidadosamente en el estudio de [7] siguiendo los métodos de entrada-salida definidos en la norma IEEE 112-B y IEC 60034-2-1. Estos son etiquetados A-F y los detalles se dan en la tabla 3.1. De los seis motores, el motor A de cuatro polos, 50 Hz, 5.5 kW es también sujeto a un ensayo de calorímetro, dentro del calorímetro de 30 kW utilizado en el estudio de Wenping Cao.

Tabla 3.1. Detalles de los motores utilizados.

<b>Motor</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
kW	5.5	11	45	90	132	150
N. Polos	4	4	2	4	2	4
Hz	50	50	50	50	50	50
V	400	400	400	400	400	400
A	11	24	75	163	226	255
RPM	1450	1455	2955	1485	2965	1487

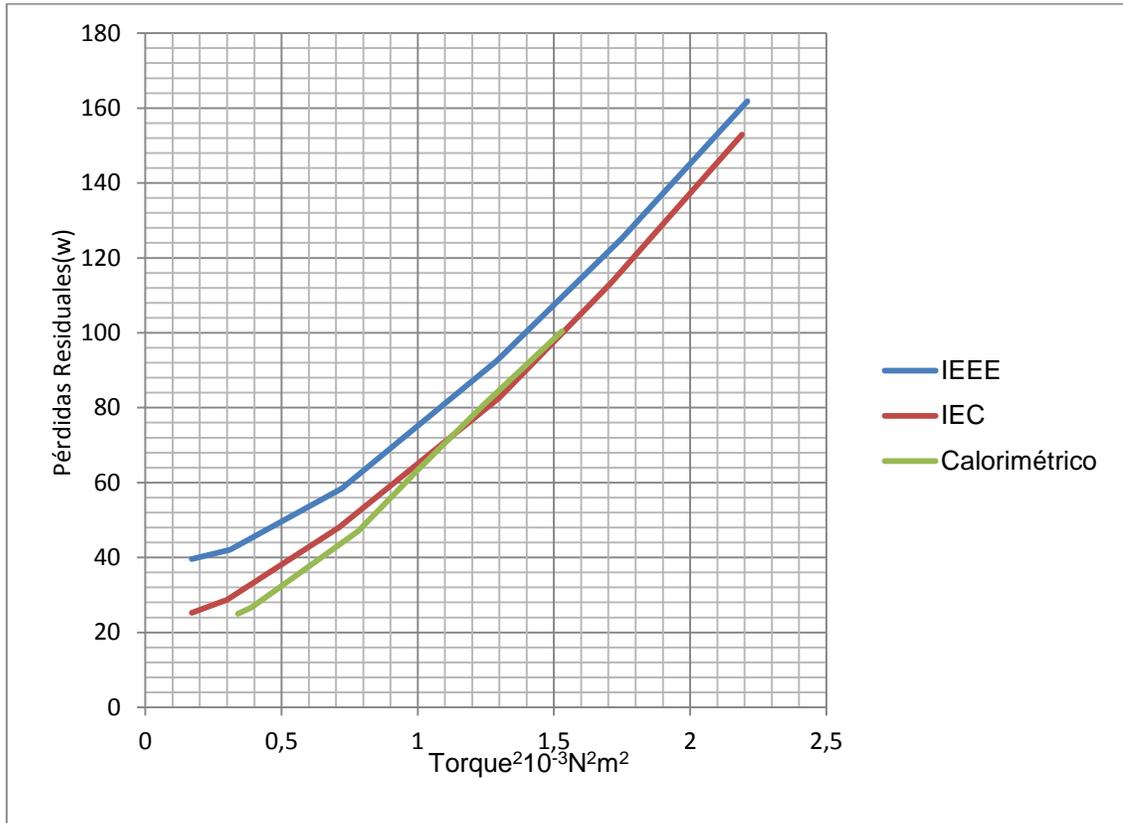
Los procedimientos del ensayo de las normas están basados en los ensayos de vacío, a plena carga, y parcialmente cargado. Los ensayos parcialmente cargados, requieren que se lleven a cabo lo más rápidamente posible en ambas normas, desde la mayor carga hasta la menor, seguido de un ensayo de estado nominal estable, los ensayos parcialmente cargados se conducen a la temperatura de la máquina relacionada con la condición de plena carga. También, en los ensayos calorimétricos, los resultados del ensayo parcialmente cargado corresponden a la temperatura en estado estable de la máquina asociada con la operación en la condición de carga parcial. Esto debe guiarnos a algunas diferencias entre la norma y las aproximaciones calorimétricas, especialmente para aquellas cargas ligeras.

### **Ensayos calorimétricos.**

Como se muestra en el estudio de [14], el calorímetro puede proveer resultados exactos para la pérdida total de potencia. Pero las segregaciones de pérdidas todavía recaen en otros métodos. En este caso se usa IEEE 112-B. ya que las pérdidas adicionales de la carga en el motor de inducción son una componente sensible derivada desde la substracción de las pérdidas identificables de la pérdida total de potencia, de esta forma, se usa en este estudio para la comparación entre los métodos calorimétrico y entrada-salida con fines de detectar un pequeño cambio en las pérdidas. Los resultados del ensayo están graficados en la Fig.3.1.

La Fig.3.1 presenta la pérdida residual graficada contra el cuadrado del torque de la carga del motor A. Se obtienen resultados para un rango de valores de la carga que incluye 25%, 50%, 75%, 85%, 100%, y 110% a lo largo del ensayo del calorímetro con dos conjuntos de resultados de ensayos de IEEE 112-B e IEC 60034-2-1 que extienden los puntos de carga más lejos del 130%.

Figura.3.1: Comparación de los métodos entrada-salida y calorimétrico de las normas.



Claramente la Fig.3.1 nos da una buena impresión de la forma de la curva de pérdidas residuales que se fuerza a encajar en una línea recta. La figura incluso muestra una buena concordancia entre los valores obtenidos por la técnica del calorímetro de las pérdidas residuales y el método entrada-salida de las normas.

Como puede apreciarse los resultados del calorímetro presentan una forma de curva lineal que pasa a través de los puntos de cero carga mientras que los resultados que arrojan las normas IEEE e IEC presentan una ligera curvatura en cargas ligeras y un contrarresto cero, primeramente debido a la dificultad de los métodos de las normas para determinar pequeñas pérdidas de potencia, y en particular, un trazo inapropiado de la temperatura en los devanados del

estator (o resistencias) cuando el motor esté emprendiendo un rápido decrecimiento desde la reducción de la carga.

### **3.1.1 Resultados de eficiencia obtenidos en los ensayos realizados a los motores mencionados anteriormente.**

Los resultados de las pérdidas de potencia se dan en la tabla 3.2. Todos los componentes de las pérdidas, excepto las pérdidas por fricción y devanados, están corregidos en la tabla de acuerdo a las normas IEEE e IEC. Las pérdidas adicionales de la carga se obtienen de homogenizar las pérdidas residuales y removerlas a contrarresto cero.

Tabla 3.2. Pérdidas y eficiencia por las normas IEEE 112-B e IEC 60034-2-1.

Motor	Normas	Estator $P_R$ (W)	Rotor $P_R$ (W)	$P_{ac}$ (W)	$P_{fw}$ (W)	$P_{ad}$ (W)	$\eta$ (%)
A	IEEE	411.2	212.9	131.5	22.5	72.8	86.7
	IEC	409.4	213.3	120.4	21.8	80.2	86.7
B	IEEE	556.1	238.5	269.1	35.3	120.5	90.0
	IEC	557.7	238.6	265.2	35.9	135.5	89.9
C	IEEE	801.8	697	730.9	386.4	363.1	93.8
	IEC	801.3	696.8	722.1	387.6	378.0	93.8
D	IEEE	1362.8	829.2	1645	719.5	520.4	94.6
	IEC	1361.4	829.3	1633	718.1	539.7	94.6
E	IEEE	2357.6	1704.8	1925.3	3434	475.1	93.0
	IEC	2359.7	1705.2	1891.6	3431	511.4	93.0
F	IEEE	1981.1	1017.6	2118.2	772.9	1112,0	95.6
	IEC	1983.9	1017.3	2075.1	772.1	1149,0	95.5

Como se muestra en la tabla 3.2, no hay distinciones significativas en la pérdida de los conductores del rotor, y las pérdidas de los devanados y por fricción

entre IEEE 112 e IEC 60034-2-1 porque ambos métodos utilizan exactamente las mismas técnicas.

Entre los seis motores, las distinciones en las pérdidas de joule en el estator son insignificantes aunque la determinación de las resistencias de los devanados del estator y temperatura es bastante diferente entre las dos normas, los resultados reales de las pérdidas en los conductores del estator permanecen cercanos, casi dentro de los errores de la medición que los instrumentos pueden medir. Puede decirse que, mientras que los métodos de las normas sean seguidos estrictamente, ninguna puede proveer valores relativamente exactos de la resistencia de los devanados del estator, especialmente para la condición de carga nominal. Sin embargo, las diferencias más notorias se presentan en las pérdidas adicionales.

Por el contrario, en la determinación de las pérdidas del núcleo, la norma IEC especifica un bastante detallado procedimiento. Teniendo en cuenta la caída de voltaje resistiva en la determinación de las pérdidas en el núcleo, esta norma brinda valores más pequeños pero más exactos que los de la norma IEEE. Claramente este es el caso para estos seis motores bajo ensayo.

Como puede apreciarse en la tabla 3.2, las diferencias en los resultados de las pérdidas en el núcleo entre los dos métodos están en el rango de 4-43 W, típicamente dentro de una proporción del 1-2% de las pérdidas del núcleo excepto por el motor A, el cual es un asombroso 8%. No obstante, la determinación exacta de las pérdidas del núcleo por el método de IEC no guía naturalmente a una figura de eficiencia exacta.

Como se ilustra en la tabla 3.2, las mayores diferencias entre las normas se encuentran en los resultados obtenidos de pérdidas adicionales de la carga para todos los motores se incrementan por 7-37 W comparadas con las de la IEEE. Las pérdidas adicionales juegan un papel importante en la composición de las pérdidas totales, con lo cual cobra importancia el análisis que se desarrolla más adelante.

También se muestra en la tabla 3.2 que, para estos seis motores bajo ensayo, los resultados de eficiencia son exactamente los mismos entre los métodos de la IEEE y la IEC para los motores A, C, D, y E. Hay un 0.1% de diferencia para los motores B, y F. De hecho la mayor diferencia puede encontrarse en los valores de eficiencia que no sean los nominales, especialmente a altos niveles de carga. Por lo tanto, la eficiencia nominal sola no es suficiente para describir la ejecución de un motor, ya que es altamente improbable para un motor de inducción operar bajo la condición nominal de servicio.

### **3.1.2 Análisis de los resultados.**

De acuerdo con la comparación mostrada, los resultados arrojados por la misma y apoyándonos en la bibliografía utilizada se pudo apreciar que en la aplicación de las norma IEEE 112 y la IEC 60034-2-1 la mayor desviación de la eficiencia en los motores trifásicos de inducción están dadas en los valores de las pérdidas adicionales.

Las pérdidas adicionales en carga  $P_{ad}$  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.

Estas pérdidas en la forma más simple se pueden definir como aquellas 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.

De acuerdo con el análisis realizado sobre los métodos definidos por ambas normas se conoce que a la hora de determinar las pérdidas adicionales utilizando la norma IEEE 112 el método B ( Entrada-Salida con segregación de pérdidas y medición indirecta de pérdidas adicionales con carga.) es el más utilizado.

En cuanto a la determinación de estas pérdidas la norma IEC 60034-2-1 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.

En la figura 3.1 se hace referencia a los métodos entrada-salida (IEEE 112) y cálculo a partir de las pérdidas residuales (IEC 60034-2-1) los cuales se consideran indirectos. En esta figura se aprecia la dificultad de los métodos de las normas para determinar pequeñas pérdidas de potencia, y en particular, un trazo inapropiado de la temperatura en los devanados del estator (o resistencias) cuando el motor esté emprendiendo un rápido decrecimiento desde la reducción de la carga.

El método prueba de rotor removido y una prueba de rotación inversa (método directo).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.

Otra vía para determinar estas pérdidas de acuerdo con (IEC 60034-2-1) consiste en la asignación de pérdidas (método indirecto). 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.

Recientemente se han estudiado otras alternativas y se definió otro método de medición directa denominado Eh-Star (IEC 60034-2-1), el cual ha demostrado ser un método relativamente fácil de aplicar y con resultados bastante aceptables.

### **3.2 Valoración del método más apropiado para determinar las pérdidas adicionales, de acuerdo a los resultados.**

De acuerdo al estudio realizado y los resultados obtenidos en la realización del trabajo se pudo comprobar que la norma más apropiada para determinar las pérdidas adicionales es la IEC 60034-2-1. Esta norma ofrece una metodología más amplia que su contraparte IEEE 112 en cuanto a métodos directos e indirectos.

### **3.3 Propuesta de vías para la determinación de la eficiencia de los motores trifásicos de inducción.**

Conociendo la importancia de los motores trifásicos de inducción en la actualidad y lo que representan en cuanto a consumo de energía, es necesario proponer vías para determinar su eficiencia.

Una vez realizado el estudio detallado de las normas IEE112 y IEC 60034.2.1 se propone que para determinar la eficiencia de los motores de inducción trifásicos se utilice la norma IEEE 112, estimando las pérdidas adicionales con la carga por la norma IEC 60034-2-1.

### **3.4 Valoración científica del trabajo.**

El trabajo que se presenta constituye un referente teórico y metodológico para los investigadores en el campo de las máquinas de inducción trifásicas, en el se

ofrecen herramientas para utilizar de manera óptima las normas IEE 112 y IEC 60034.2.1.

### **3.5 Valoración social del trabajo**

La preocupación mundial generada por la crisis energética ha obligado a los gobiernos a trazar políticas y regulaciones que contribuyan al mejoramiento de la eficiencia energética, con este estudio se realiza una modesta contribución al uso eficiente de la energía para el desarrollo industrial, económico y social.

#### **Conclusiones parciales.**

A partir del ejemplo mostrado en el capítulo se aplican las normas a seis motores de diferentes potencias, se obtienen resultados que son analizados y comparados de donde se deriva que las mayores diferencias en los valores obtenidos se encuentran en las pérdidas adicionales. Se analizaron estos resultados y los métodos definidos por las normas para determinar las pérdidas adicionales por lo que se concluyó haciendo una propuesta para determinar las mismas.

## Conclusiones Generales

1. Se realizó una revisión de las normas IEEE 112 y la IEC 60034-2-1 de acuerdo a los métodos propuestos por ambas donde se mostró el procedimiento de los mismos así como su forma de cálculo.
2. Se efectuó una comparación de las normas IEEE 112 y IEC 60034-2-1 donde se expusieron las principales semejanzas y diferencias de estas para determinar la eficiencia de una máquina de inducción.
3. Se mostraron las pruebas realizadas a seis motores trifásicos de inducción de diferentes potencias y se analizaron los resultados arrojados por estas, se propuso una vía para determinar la eficiencia de estos motores.

## Recomendaciones

- 1 Continuar con el estudio realizado con el objetivo de proponer un método más efectivo para determinar la eficiencia de los motores trifásicos de inducción.
- 2 Estudiar detalladamente otras normas con el objetivo de aumentar el rendimiento de estos motores.

## *Bibliografía.*

1. ENERGY, D.O., *United States industrial electric motor systems market opportunities assessment*. 1998. .
2. ALMEIDA, A.F.F DE., *Efficiency Testing of Electric Induction Motors*. 2000.
3. ESTADÍSTICA, O.N.D., *Electricidad en Cuba*. 2011.
4. 112, I.S., *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. 2004.
5. 60034-2-1, I., *Rotatory Electrical Machines part 2-1, Standard Methodes For Determiny Losses And Efficient From Tests*. 2007.
6. A. T. de Almeida, F.T.E.F., J. F. Busch, and P. Angers, *Compar-ative analysis of IEEE 112-B and IEC 34-2 efficiency testing standards using stray load losses in lowvoltage three-phase, cage inductionmotors*. 2002. **38**.
7. Cao, W., *Comparison of IEEE 112 and New IEC Standard 60034-2-1*. 2010.
8. B. C. Johnson, D.G.D., and R. Hulett, *Seeking global harmony instandards*. 2004.
9. W. Cao, K.J.B., and A. Ferrah, *Development of a high-precisioncalorimeter formeasuring power loss in electricalmachines*. 2009.
10. Soares, P.K.-D.a.G., *Harmonization of induction motor effi-ciency standards in Latin America*. 1997.
11. W.cao, *Accurate measurement and evaluation of losses and efficiency of new and rewound induction motors*. 2004.
12. B. Renier, K.H., and R. Belmans, *Comparison of standards fordetermining efficiency of three phase induction motors*. 1999.
13. K. J. Bradley, a.J.A.W.C., *Evaluation of additional loss ininduction motors consequent upon repair and rewinding*. 2006.
14. Cao, K.J.B.A.F.W., *Development of a High-Precision Calorimeter for Measuring Power Loss in Electrical Machines*. 2010.

## ANEXOS

Anexo A:

Tabla 1.1: Método A. Entrada–Salida:

No.	Descripción	Puntos de Carga (%)					
		25	50	75	100	125	150
1	Temperatura Ambiente en C <sup>0</sup>						
2	Temperatura del enrollado del estator en C <sup>0</sup> a t <sub>i</sub> .						
3	Frecuencia, en Hz						
4	Deslizamiento observado, en r/min						
5	Deslizamiento corregido, en r/min						
6	Velocidad, en r/min						
7	Torque						
8	FCD Corrección del dinamómetro						
9	Torque corregido, en n.m						
10	Potencia mecánica, en hp						
11	Corriente de línea, en A						
12	Factor de Potencia, en %						
13	Potencia en el estator, en W						
14	Pérdidas en estator, en W a (t <sub>s</sub> ) en C <sup>0</sup>						
15	Pérdidas en estator, en W a (t <sub>i</sub> ) en C <sup>0</sup>						
16	Corrección de las pérdidas en el estator, en W						
17	Potencia corregida en el estator, en W						
18	Eficiencia, en %						

Tabla 1.2 Características de funcionamiento.

Características	Puntos de Carga (%)					
	25	50	75	100	125	150
Factor de Potencia (%)						
Eficiencia, en %						
Velocidad, en r/min.						
Corriente de línea, e A						

Tabla 1.3 Método B: Entrada-Salida con segregación de pérdidas y medición indirecta de pérdidas adicionales con carga.

No.	Descripción	Puntos de Carga (%)					
		25	50	75	100	125	150
1	Temperatura Ambiente en C <sup>0</sup>						
2	Temperatura del enrollado del estator en C <sup>0</sup>						
3	Frecuencia, en Hz						
4	Velocidad Sincrónica, en r/min						
5	Deslizamiento, en r/min						
6	Velocidad, en r/min						
7	Tensión de línea, en V						
8	Corriente de línea, en A						
9	Potencia en el estator, en W						
10	Pérdidas en el Núcleo, en W						
11	Pérdidas en estator, en W a (t <sub>i</sub> ) en C <sup>0</sup>						
12	Potencia electromagnética, en W						
13	Pérdidas en rotor, en W						
14	Pérdidas por fricción y batimiento, en W						
15	Pérdidas totales convencionales, en W						
16	Torque						
17	Corrección del dinamómetro, en n.m.						
18	Torque corregido						
19	Potencia mecánica, en W						
20	Pérdidas totales aparente, en W						
21	Pérdidas adicionales con carga, en W						
22	Pérdidas en estator, en W a (t <sub>s</sub> ) en C <sup>0</sup>						
23	Potencia electromagnética corregida, en W						
24	Deslizamiento corregido, en r/min						
25	Velocidad Corregida, en r/min						
26	Pérdidas en rotor, en W a (t <sub>s</sub> ) en C <sup>0</sup>						
27	Pérdidas adicionales, en W corregidas con carga, en W						
28	Pérdidas totales corregidas, en W						
29	Potencia mecánica corregida, en W						
30	Potencia mecánica, en hp						
31	Eficiencia, en %						
32	Factor de Potencia, en %						

Tabla 1.4. Valores asumidos de pérdidas adicionales con carga. Método B.

<b>Clasificación de las Máquinas</b>		<b>Pérdidas adicionales con carga en % de la potencia nominal de salida</b>
1-125 Hp	1-90 kW	1.8 %
16-500 Hp	91-375 kW	1.5%
501-2499 Hp	376-1850 kW	1.2 %
2500 Hp y más grande	1851 kW y más grande	0.9 %

Tabla 1.5. Método C: Máquina dobles con segregación de pérdidas y mediciones indirecta de pérdidas adicionales con carga.

No.	Descripción	Puntos de Carga (%)					
		25	50	75	100	125	150
1	Temperatura Ambiente en C <sup>0</sup>						
2	Temp. Del enrollado del estator t <sub>i</sub> en C <sup>0</sup>						
3	Frecuencia, en hz						
4	Deslizamiento, en rev/min						
5	Velocidad, en rev/min						
6	Tensión de línea, en V						
7	Corriente de línea, en A						
8	Potencia en el estator, en W						
9	Pérdidas en el Núcleo, en W						
10	Pérdidas en estator, en W a (t <sub>i</sub> ) en C <sup>0</sup>						
11	Potencia electromagnética, en W						
12	Pérdidas en rotor, en W						
13	Pérdidas por fricción y batimiento, en W						
14	Pérdidas totales convencionales, en W						
15	Corriente en el rotor, en A						
16	Corriente en el rotor promedio, en A						
17	Pérd. adicionales con carga prom, en W						
18	Pérdidas en estator, en W a (t <sub>s</sub> ) en C <sup>0</sup>						
19	Potencia electromagnética corregida, en						
20	Deslizamiento corregido, en r/min						
21	Velocidad Corregida, en r/min						
22	Pérdidas en rotor, en W a (t <sub>s</sub> ) en C <sup>0</sup>						
23	Pérdidas adicionales con carga, en W						
24	Pérdidas totales corregidas, en W						
25	Potencia mecánica corregida, en W						
26	Potencia mecánica, en hp						
27	Eficiencia, en %						
28	Factor de Potencia, en %						

Tabla 1.6 Método E o E1: Medición de la potencia eléctrica con segregación de pérdida.

No.	Descripción	Puntos de Carga (%)					
		25	50	75	100	125	150
1	Temperatura Ambiente en C <sup>0</sup>						
2	Temperatura del enrollado del estator en C <sup>0</sup> a t.						
3	Frecuencia, en hz						
4	Deslizamiento, en r/min						
5	Deslizamiento corregido, en rev/min						
6	Velocidad corregida, en rev/min						
7	Tensión de línea, en V						
8	Corriente de línea, en A						
9	Potencia en el estator, en W						
10	Pérdidas en el Núcleo, en W						
11	Pérdidas en estator, en W a (ts) en C <sup>0</sup>						
12	Potencia electromagnética, en W						
13	Pérdidas en rotor, en W						
14	Pérdidas por fricción y batimiento, en W						
15	Corriente en el rotor, en A						
16	Pérdidas adicionales con carga, en W						
17	Pérdidas totales, en W						
18	Potencia mecánica, en W						
19	Potencia mecánica, en hp						
20	Eficiencia, en %						
21	Factor de Potencia, en %						

Tabla 1.7 Método de prueba C/F, E/F, o E1/F1. Circuito equivalente calibrado para un punto de prueba.

No.	Descripción	Puntos de carga (%)					
		25	50	75	100	125	150
1	Deslizamiento en por unidad, S						
2	Resistencia de rotor dividido por el deslizamiento						
3	Reactancia en el rotor, $X_2$						
4	Impedancia del rotor, $Z_2$						
5	Conductancia en el rotor, $g_1$						
6	Conductancia en el núcleo, $g_{fe}$						
7	Conductancia, $g$						
8	Suceptancia en le rotor, $b_2$						
9	Suceptancia de magnetización, $b_m$						
10	Suceptancia, $b$						
11	Admitancia, $Y$						
12	Resistencia, $r_g$						
13	Resistencia por fase, $r_1$						
14	Resistencia, $r$						
15	Reactancia, $X_g$						
16	Reactancia en estator, $X_1$						
17	Reactancia, $X$						
18	Impedancia, $Z$						
19	Corriente en el estator, $I_1$						
20	Corriente en el rotor, $I_2$						
21	Potencia en el estator, $P_s$						
22	Potencia electromagnética, $P_m$						
23	Pérdida en el estator, $p_s$						
24	Pérdida en le núcleo, $p_{núcleo}$						
25	Pérdida en el rotor, $p_2$						
26	Pérdidas por fricción y batimiento						
27	Pérdidas adicional con carga, $W_{LL}$						
28	Pérdida totales, $p_{totales}$						
29	Potencia rotor, $P_m$ , en W						
30	Eficiencia, $\eta$						
31	Factor de potencia, $fp$						
32	Potencia en el rotor, $P_m$ , en hp						
33	Velocidad, $n$						
34	Torque, $T$						

Tabla 1.8. Temperatura especificada.

Clase de sistema de aislamiento	Temperatura en $C^{\circ}$
A	75
B	95
F	115
H	130

Figura 1.1 Anexo A. Determinación de las pérdidas por rozamientos mas ventilación.

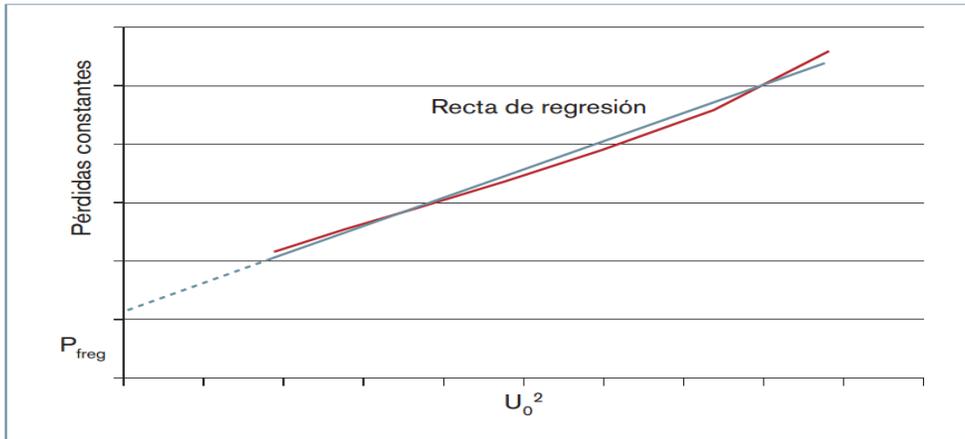


Figura 1.2 Anexo A. Gráfica para la determinación de las pérdidas en el hierro.

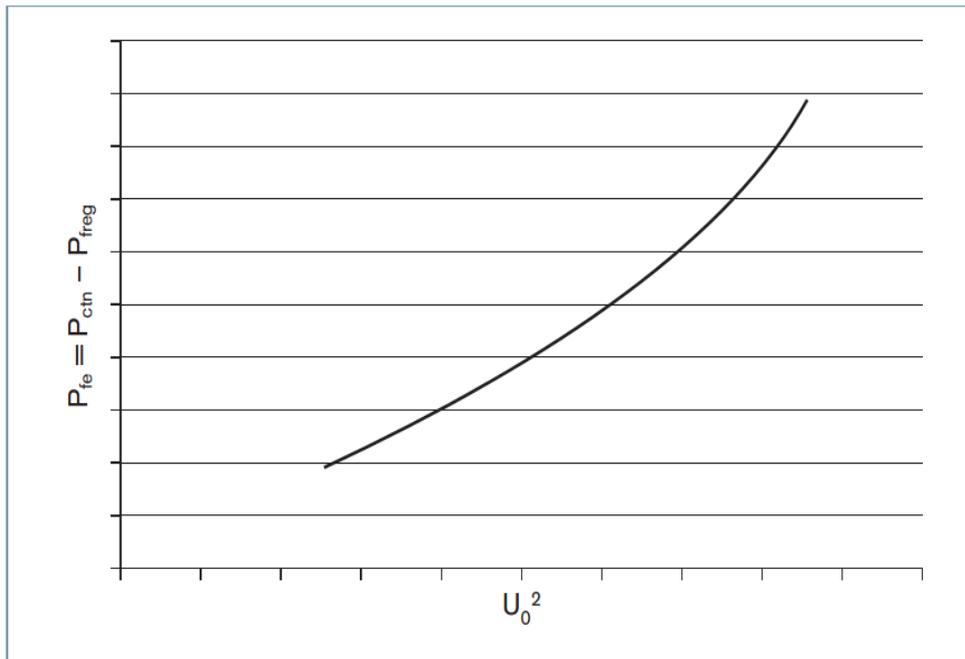


Figura 1.3 Anexo A. Regresión para suavización de pérdidas residuales.

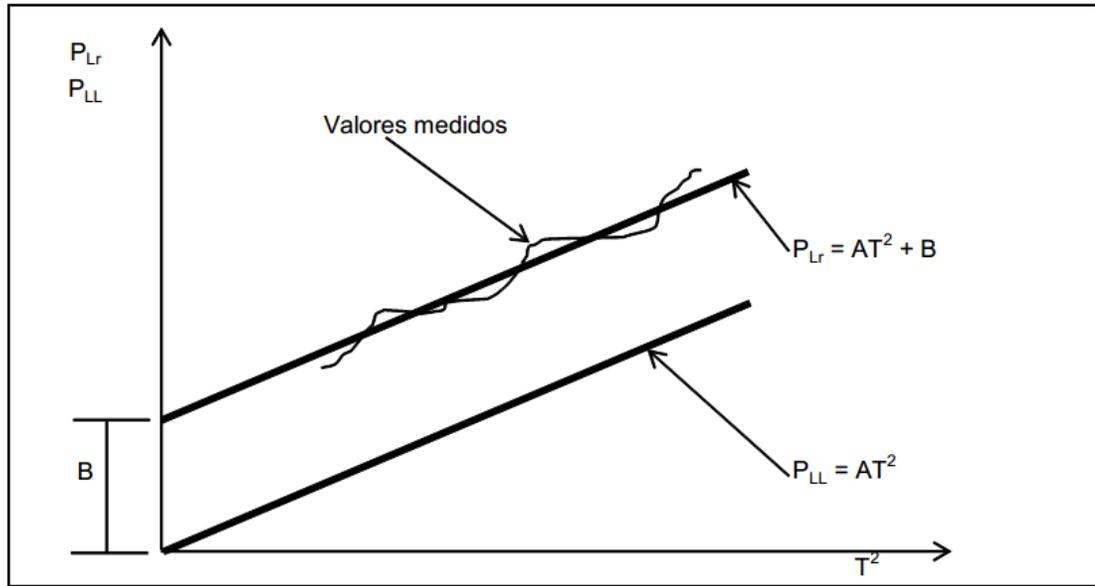


Figura 1.4 Anexo A. Recta suavizada de las pérdidas adicionales.

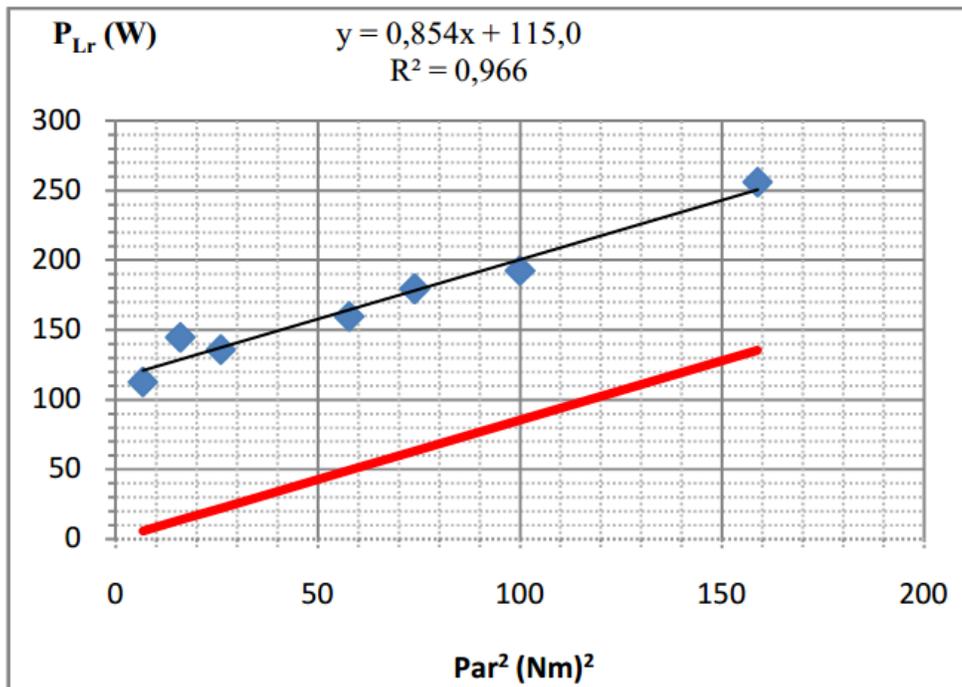


Figura 1.5 Anexo A. Curva de obtención de las pérdidas adicionales en función de la potencia útil de la máquina.

