



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO PARA
ESTIMAR LA INCERTIDUMBRE ASOCIADA A
LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES DE
CORRIENTE ALTERNA TRIFASICOS.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO
ELECTRICISTA
(AREA INDUSTRIAL)
P R E S E N T A :
MARTINIANO SARABIA JUÁREZ



ASESOR DE TESIS:
M. I. RIGOBERTO NAVA SANDOVAL

MEXICO, D.F.

ABRIL 2005

0346580



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatorias

A Dios.
Porque me diste la fuerza para no claudicar
A pesar de los momentos difíciles.


A ti madre.
Porque estas conmigo siempre,
por tu ejemplo de tenacidad
para lograr lo que te propones
y sobre todo; por tu gran amor
para el cual no existen barreras,
¡lo logramos!

A mi esposa Lulú.
Por compartir mi vida, mis sueños y apoyarme
a conseguirlos.

A mis hijos.
Los dos regalos que dios me dio,
porque me motivan a lograr esto
y muchas cosas mas,
para ustedes mis "changuitos"
Laurita y Diego

A mi padre y hermanos.
Porque juntos logramos hacer un gran equipo

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: MARTINIANO
SARABIA SUAREZ
FECHA: 29-04-05
FIRMA: 

Agradecimientos

Agradezco de manera muy especial a mi director de tesis, al M. I Rigoberto Nava Sandoval por apoyarme con su experiencia y conocimiento en el desarrollo de este trabajo, brindarme su amistad, pero sobre todo por su gran paciencia ante mi lentitud.

De igual manera agradezco a mis primas Juana y Dolores Sarabia Estrada por su apoyo incondicional económico y moral en varios años de mi carrera.

A mi hermano Primo Sarabia Cruz por tus consejos para lograr algo mas y apoyarme en mi aventura a la ciudad de México ya que yo solo no me hubiera atrevido.

A la gente buena que me encontré en mi camino y conociendo mis situación me brindo su apoyo: Doña Chabelita, C.P. Alejandro, Sra. Lourdes, Haydee Torres, Xochitl Sánchez.

A mis profesores quienes a lo largo de la carrera contribuyeron a mi formación.

A Rubén Alejos García, compañero de seminario quien me ofreció trabajo el cual me permitió adquirir experiencia en el campo profesional como Asesor en Sistemas de Calidad y Metrología.

A mis sinodales por dedicar parte de su tiempo en la revisión y valoración de este trabajo.

Índice

Introducción

- Planteamiento del problema
- Justificación
- Hipótesis
- Objetivos
- Descripción de los capítulos

I Antecedentes

- 1.1 Ley Federal Sobre Metrología y Normalización
- 1.2 Laboratorios de ensayo como una herramienta para el control de la calidad
- 1.3 La Entidad Mexicana de Acreditación (EMA)
- 1.4 Política de trazabilidad e incertidumbres de la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA)
- 1.5 La evolución sobre estimación de incertidumbres
- 1.6 Experiencias previas en la estimación de la incertidumbre en motores de inducción.
- 1.7 Cumplimiento de Normas Oficiales Mexicanas (NOM).

II Marco teórico.

2.1 Metodología de ensayo.

- 2.1.1 Métodos de prueba para la determinación de la eficiencia energética
- 2.1.2 Condiciones de prueba
- 2.1.3 Instrumentos de medición y equipo de prueba
- 2.1.4 Procedimientos de prueba
- 2.1.5 Segregación de perdidas
- 2.1.6 Corrección por temperatura para las perdidas por efecto joule
- 2.1.7 Cálculo de la potencia de salida a 25C
- 2.1.8 Cálculo de la eficiencia
- 2.1.9 Eficiencia en cualquier punto de carga

2.2 Incertidumbre de las mediciones.

- 2.2.1 Concepto
- 2.2.2 Evaluación de la incertidumbre estándar
- 2.2.3 Modelos de medición
- 2.2.4 Identificación de las fuentes de incertidumbre
- 2.2.5 Evaluación de la incertidumbre tipo A
- 2.2.6 Evaluación de la incertidumbre tipo B
- 2.2.7 Determinación de la incertidumbre estándar combinada
- 2.2.8 Determinación de la incertidumbre expandida

- 2.2.9 Incertidumbre expandida
- 2.2.10 Elección del factor de cobertura

2.2.11 Aplicación de la incertidumbre

III Metodología

- 3.1 Observación del desarrollo de la prueba para obtención de la eficiencia energética.
- 3.2 Revisión exhaustiva de la información involucrada.
- 3.3 Análisis del tipo de medición y modelo matemático de la eficiencia.
- 3.4 Obtención de la expresión de incertidumbre combinada de cada fuente.
- 3.5 Obtención de la expresión de la incertidumbre expandida.
- 3.6 Procedimiento para estimar la incertidumbre
- 3.7 Validación del procedimiento

IV Análisis de resultados

- 4.1 Tabla y grafica comparativas de incertidumbres
- 4.1 Relación de la incertidumbre con la tolerancia

V Conclusiones

Bibliografía

Anexos

Introducción

Actualmente, el fabricante de bienes y servicios requiere elaborar productos de calidad para lograr la confianza de sus clientes. Para ello necesita cumplir tanto los requisitos establecidos por los mismos, así como los legales y reglamentarios y otras especificaciones establecidas en normas. Invariablemente involucra de manera contundente el control de la calidad y, este proceso a su vez, es auxiliado por pruebas validadas las cuales se apoyan en la normalización y la metrología¹.

Los laboratorios de ensayos juegan un papel importantísimo como herramientas de control de la calidad, ya que a través de pruebas diversas aplicadas a un producto, determinan las características del mismo. Todas las pruebas se basan en los lineamientos establecidos generalmente en normas.

Una prueba puede ser cualitativa² o cuantitativa³. En este último tipo de pruebas el resultado lleva asociado un parámetro llamado incertidumbre de la medición. La estimación de la incertidumbre es un requisito establecido por norma que deben cumplir los laboratorios que realizan pruebas y reportan resultados en un informe.

En este documento se expone el análisis y desarrollo de la metodología para estimar la incertidumbre que ha de asociarse al resultado obtenido cuando se realicen pruebas a motores trifásicos de inducción tipo jaula de ardilla. Adicionalmente, se establece un procedimiento detallado el cual puede ser empleado por el personal calificado de un laboratorio que realiza este tipo de pruebas.

Planteamiento del problema

El problema a resolver es el cómo estimar la incertidumbre asociada al resultado obtenido del valor de la eficiencia calculada en motores trifásicos de inducción tipo jaula de ardilla. Para ello se requiere diseñar una metodología ya que hasta la fecha no se ha establecido ninguna.

Justificación

Una de las pruebas que realiza el laboratorio de ensayos de Siemens, es la de determinación de la eficiencia energética a motores de corriente alterna trifásicos tipo jaula de ardilla. Como organismo de evaluación de la conformidad acreditado, dicho laboratorio esta obligado a cumplir las políticas de calidad establecidas por la

¹ Metrología se define como la ciencia de las mediciones y todo lo que en ello se involucra.

² Aquella prueba en la que no se realiza medición, puede ser de apreciación visual, ej, cambio de color.

³ Tipo de prueba en la cual se obtiene un resultado a través de una medición.

Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), una de ellas, específicamente la de incertidumbres en las mediciones [1] que entró en vigor desde el 12 de diciembre del 2002 establece textualmente en su capítulo 4:

Los laboratorios de ensayo deben:

Poseer y aplicar procedimientos para estimar la incertidumbre de medición asociada con los resultados de los ensayos así mismo esta información debe estar disponible y ser lo suficiente clara para los usuarios.

El tema de incertidumbres es nuevo para la mayoría de los integrantes de los laboratorios y aunque ya se han realizado metodologías para su estimación, la problemática debida a la gran variedad de métodos de ensayo que existen hace difícil desarrollar una forma específica para cada una de ellas.

La entidad de acreditación consiente de la problemática permite que los laboratorios puedan cumplir con esta política presentando un plan de implantación que contenga los pasos que dará el laboratorio para implementar su procedimiento para calcular la incertidumbre de medición reportando trimestralmente a EMA el avance que se obtenga, teniendo como tiempo limite un año a partir de la fecha establecida.

Actualmente se han formado varios grupos de trabajo para desarrollar la metodología en el calculo de incertidumbres sin embargo el avance ha sido lento principalmente por dos causas: La poca familiaridad con el tema de incertidumbres y el tiempo que le destinan para este tipo de trabajo.

Desarrollar la metodología para el calculo de incertidumbres en este tipo de ensayos en primera instancia le ayudara al laboratorio de ensayos de Siemens a cumplir con el requisito establecido en la política de incertidumbres la cual hace cumplir la EMA, además se hará una contribución importante como referencia para el desarrollo de metodologías en otras áreas.

Hipótesis

Se busca desarrollar una metodología para la estimación de incertidumbres asociadas a los resultados de la eficiencia calculada a motores de inducción tipo jaula de ardilla tomando como fundamento la guía para la expresión de las incertidumbres en las mediciones.

Objetivo

Desarrollar una metodología para estimación de incertidumbre de la eficiencia energética de motores de inducción trifásicos para documentar un procedimiento que cumpla los requisitos establecidos por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA).

Descripción de los capítulos

En el *Capítulo I* antecedentes, se expone la Ley Federal Sobre Metrología y Normalización [1], documento que sirve de marco con respecto a la metrología legal, ya que se encarga de establecer y regular los lineamientos en cuanto a la normalización y evaluación de la conformidad⁴. También se trata el tema de los laboratorios de ensayo como herramienta fundamental para lograr la calidad de los productos.

Un organismo de evaluación de la conformidad que juega un papel protagónico es la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), la cual, facultada para realizar procesos de acreditación, a difundido y promovido que los laboratorios de ensayo se acrediten con más enfoque a la calidad del producto que a un requisito obligatorio ya que actualmente los procesos de acreditación no son obligatorios.

Una serie de documentos que refuerza y hace más eficaz la acreditación, son las políticas de trazabilidad e incertidumbres emitidas por la EMA, es por esto que en este capítulo se exponen estas políticas resaltando la parte en donde tocan el tema de incertidumbres.

También se hace una retrospectiva sobre la evolución en las estimaciones de la incertidumbres, así como las experiencias previas de análisis en motores de inducción. Y por último en este capítulo se resalta la importancia de cumplir con las normas oficiales mexicanas, ya que las pruebas realizadas a motores motivo de nuestro estudio cumplen la norma oficial mexicana NOM-016-ENER-2002 [3].

En el *Capítulo II* Marco Teórico, se tocan dos temas fundamentales. Por un lado se describe la metodología normalizada para realizar la prueba a los motores trifásicos y por el otro se describe la teoría de incertidumbres, ambos temas son los pilares para comprobar nuestra hipótesis.

La metodología que se aplica para lograr un análisis efectivo del proceso de medición en la prueba a motores de inducción trifásicos se describe en el *Capítulo III* Metodología, además, producto de lo desarrollado en este capítulo, se

⁴ Proceso mediante el cual se asegura que un proceso, sistema o producto se ajusta a los lineamientos o recomendaciones de normas nacionales o internacionales.

establece el procedimiento para realizar la estimación de incertidumbre, así como también se verifica su eficacia aplicándolo a los datos de la prueba realizada.

En el *Capítulo IV* Análisis de resultados, se realiza un análisis de los resultados obtenidos con la aplicación del procedimiento desarrollado y comparando los resultados de incertidumbres al asociar este parámetro con las tolerancias de eficiencia de los motores.

En el capítulo V de esta tesis se presentan las conclusiones sobre los resultados obtenidos con respecto a la hipótesis formulada y las recomendaciones para la aplicación de la metodología desarrollada.

Capítulo I

Antecedentes

1.1 Ley Federal Sobre Metrología y Normalización

Como resultado de la actualización de la ley general de normas y de pesas y medidas de 1961, se publica la ley federal sobre metrología y normalización el 26 de enero de 1988, en respuesta a la inquietud de diversos sectores sociales que necesitaban una legislación sobre estos temas que contribuyeran a fomentar y estimular la modernización de la producción industrial y competitividad con niveles de calidad apropiados a la nueva coyuntura de diversificación del comercio, establecida por la entrada de México al Acuerdo General Sobre Aranceles Aduaneros y Comercio (GATT) y los diversos códigos de conducta a los cuales México se adhirió.

El objeto de la ley Federal sobre Metrología y Normalización [1] en materia de metrología es:

- ⇒ establecer el Sistema General de Unidades de Medida;
- ⇒ precisar los conceptos fundamentales sobre metrología;
- ⇒ establecer los requisitos para la fabricación, importación, reparación, venta, verificación y uso de los instrumentos para medir y los patrones de medida;
- ⇒ establecer la obligatoriedad de la medición en transacciones comerciales y de indicar el contenido neto en los productos envasados;
- ⇒ instituir el Sistema Nacional de Calibración y
- ⇒ crear el Centro Nacional de Metrología, como organismo de alto nivel técnico en la materia.

El objeto de la ley Federal sobre Metrología y Normalización en materia de normalización, certificación, acreditación y verificación es:

- ⇒ fomentar la transparencia y eficiencia en la elaboración y observancia de normas oficiales mexicanas (NOM);
- ⇒ instituir la Comisión Nacional de Normalización para que coadyuve en las actividades que sobre normalización corresponde realizar a las distintas dependencias de la administración pública federal;
- ⇒ establecer un procedimiento uniforme para la elaboración de NOM's por dependencias de la administración pública federal;
- ⇒ promover la concurrencia de los sectores público, privado, científico y de consumidores en la elaboración y observancia de normas oficiales mexicanas (NOM) y normas mexicanas (NMX);

- ⇒ coordinar las actividades de normalización, certificación, verificación y laboratorios de prueba de las dependencias de administración pública federal;
- ⇒ establecer el sistema nacional de acreditación de organismos de normalización y de certificación, unidades de verificación y de laboratorios de prueba y de calibración y, en general,
- ⇒ divulgar las acciones de normalización y demás actividades relacionadas con la materia.

1.2 Laboratorios de ensayo como una herramienta para el control de la calidad.

La importancia de la calidad en la sociedad en general ha alcanzado un notable crecimiento. La calidad es ahora elemento crítico de comercio mundial, de la capacidad de defensa, de seguridad y salud humana, del mantenimiento del entorno.

Las empresas están respondiendo a este crecimiento de la importancia de la calidad y su respuesta es evidente en muchos aspectos. Uno de ellos es la competencia la cual genera mercados. Cada vez los consumidores tienen mayores opciones para adquirir un mismo producto, y su consumo será influenciado por la combinación del costo y la calidad de nuestro producto, ya sea un bien o servicio.

Es con este marco donde cobra relevancia los laboratorios de ensayos como una herramienta fundamental para garantizar el cumplimiento de las especificaciones y características definidas para los productos, a través de mediciones exactas y confiables con equipos de medición calibrados y verificados periódicamente para controlar la calidad del producto desde la materia prima, procesos intermedios hasta el producto terminado.

El funcionamiento de estos laboratorios abarca diversas áreas de la industria como las siguientes:

- ⇒ Metalmecánica
- ⇒ Eléctrica – electrónica
- ⇒ Construcción
- ⇒ Del textil y del vestido
- ⇒ Agua
- ⇒ Química
- ⇒ Fuentes fijas y ambiente laboral
- ⇒ Sanidad

Dentro de estas áreas los diversos laboratorios realizan ensayos de tipo destructivos y no destructivos, cualitativos y cuantitativos.

Una forma contundente de garantizar la competencia técnica de los laboratorios de ensayo es contar con una acreditación⁵ ante una organismo reconocido. El estar acreditado implica que el laboratorio tenga lo siguiente:

- ⇒ Un sistema de calidad conforme a los requisitos de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2000 [9]
- ⇒ Personal con la formación y la competencia adecuada para el desarrollo de las actividades propias del laboratorio.
- ⇒ Métodos de muestreo y ensayo normalizados o en su caso validados
- ⇒ Instrumentos y equipo adecuados en exactitud y alcance, para aquellos laboratorios que utilicen materiales de referencia estos deben ser certificados.
- ⇒ Instalaciones necesarias para el mejor desarrollo de los ensayos.

Los laboratorios de ensayo pueden formar parte de una organización mas grande proporcionando el servicio solamente a la organización a la que pertenecen o ser independientes (también llamados externos) proporcionando el servicio a diversas organizaciones que lo soliciten, en cualquiera de los dos casos si se cuenta con un acreditación es garantía de resultados confiables.

Cualquier laboratorio que se acredite es dado de alta en la lista de laboratorios acreditados ubicada en la pagina de la Entidad Mexicana de Acreditación lo cual facilita su localización y difunde su status de competencia.

1.3 La Entidad Mexicana de Acreditación (EMA)

La actividad de acreditación de organismos de la evaluación de la conformidad comenzó a operar en México desde 1980, con la puesta en marcha del Sistema Nacional de Acreditación de Laboratorios de Prueba (SINALP) y con el Sistema Nacional de Calibración (SNC). Estos dos sistemas son los pilares fundadores del sistema actual en México, que en sus inicios eran regulados por la Dirección general de normas (DGN) de la Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI).

El 15 de enero de 1999, mediante publicación en el Diario Oficial de la Federación además, con la opinión favorable de: (SAGAR, SCT, SE, SECOFI, SECTUR, SEDESOL, SEMARNAP, SS y STPS), quedó plenamente autorizada de manera oficial para operar como entidad de acreditación.

⁵ Acreditación: Proceso documentado mediante el cual, la entidad con autoridad reconocida (la EMA en México) concede un reconocimiento formal de que una persona moral o física es competente para llevar a cabo trabajos específicos.

La Entidad Mexicana de Acreditación A.C es una asociación civil sin fines de lucro conformada de acuerdo con el organigrama mostrado en la Fig. 1

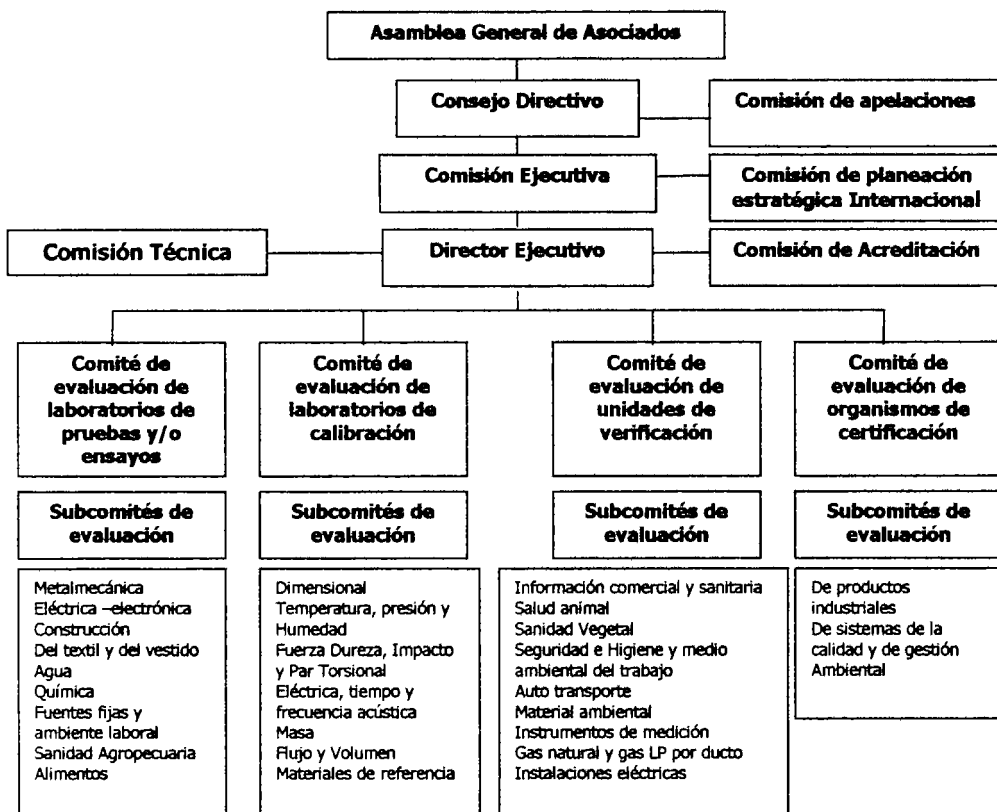


Fig. 1. Estructura organizacional de la EMA

La Entidad Mexicana tiene el firme compromiso de cumplir y hacer cumplir la normativa nacional e internacional para que se sustente la confianza, tanto en el país como en el exterior, en el sistema nacional de acreditación y de la evaluación de la conformidad.

Por un lado debe cumplir con la normativa que aplica a entidades acreditadoras:

- ⇒ NMX-EC-058-IMNC-2000 Sistema de acreditación de laboratorios de calibración y pruebas-requisitos generales para su operación y reconocimiento.
- ⇒ NMX-CC-021-IMNC-1999 Requisitos generales para la evaluación y acreditación de organismos de certificación.

- ⇒ ISO/TR 17010 Requisitos generales para organismos de acreditación de organismos de inspección para acreditar unidades de verificación.

Hacer cumplir la normativa que aplica a los organismos de evaluación de la conformidad:

- ⇒ NMX-EC-17025-IMNC-2000 Requisitos generales para la competencia de laboratorios de calibración y pruebas.
- ⇒ NMX-EC-062-IMNC-2000 Requisitos generales para organismos que realizan la evaluación y certificación/ registro de sistemas de calidad y NMX-EC-065-IMNC-2000 Requisitos generales para organismos que operan sistemas de certificación de producto.
- ⇒ NMX-EC-17020-IMNC-2000 Criterios generales para la operación de varios tipos de unidades (organismos) que desarrollan la verificación (inspección)

La Entidad Mexicana permanentemente afianza su participación y liderazgo en los organismos regionales e internacionales como los siguientes:

- ⇒ Foro internacional de Acreditación (IAF).
- ⇒ Cooperación Interamericana de Acreditación (IAAC).
- ⇒ Cooperación Norteamericana de calibración (NACC).
- ⇒ Cooperación de acreditación de laboratorios de Asia-Pacífico (APLAC).
- ⇒ Cooperación de acreditación de pacífico (PAC).

1.4 Política de trazabilidad e incertidumbres de la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA)

La necesidad de los agentes⁶ de evaluación de la conformidad de contar con lineamientos claros sobre la trazabilidad de las mediciones hizo que un grupo de gente involucrada con el tema coordinada por la EMA trabajara para desarrollar un documento que cubriera esta necesidad.

Del trabajo constante a través de reuniones periódicas surgió el documento llamado "política referente a la trazabilidad de las mediciones":

La política de trazabilidad consta de tres partes más la política de incertidumbres:

- I) Abarca las mediciones de algunas magnitudes físicas para las cuales se cuenta en México con toda la infraestructura necesaria (patrones nacionales y laboratorios de calibración acreditados).

⁶ Los agentes de evaluación de la conformidad a los que se refiere este texto son los laboratorios que realizan pruebas para determinar que un producto cumple los requisitos de la normativa aplicable.

- II) Abarca las mediciones de algunas magnitudes físicas para los cuales no se tienen patrones nacionales, laboratorios de calibración acreditados o se rompe la cadena de trazabilidad en alguno de los puntos.

- III) Se refiere a las mediciones químicas, bioquímicas y biológicas áreas en donde no se han dado grandes avances en el tema y aún a nivel internacional existen debates.

A continuación se describe únicamente lo referente a las partes I y II ya que nuestro tema de aplicación no involucra mediciones químicas, bioquímicas o biológicas.

Parte I

Políticas

Respecto a la trazabilidad⁷ a patrones nacionales. Los agentes de evaluación de la conformidad deben cumplir con la trazabilidad a patrones nacionales autorizados por la secretaria de economía.

Respecto a la calibración de sus equipos y patrones.

- ⇒ Los agentes de evaluación de la conformidad acreditados por EMA deben demostrar que la calibración de sus equipos críticos⁸, y por lo tanto los resultados generados por tal equipo relevantes a su alcance de acreditación, sean trazables al Sistema Internacional de Unidades de Medida (SI).
- ⇒ La calibración del equipo debe ser realizada por laboratorios competentes.
- ⇒ En ningún caso los resultados de la verificación de características metroológicas sustituye la calibración de un instrumento de medición.

Respecto a la estimación de la incertidumbre de medición.

La EMA establece que la incertidumbre de las mediciones debe ser calculada de acuerdo a los métodos establecidos en la norma NMX-CH-140-IMNC-2002 [6], y debe ser declarada a cada paso de la cadena de tal manera que la incertidumbre, para la cadena completa, pueda ser calculada. Estas incertidumbres deben estar soportadas matemáticamente y ser expresadas como expandidas con un nivel de confianza de aproximadamente un 95% y su factor de cobertura correspondiente.

⁷ Trazabilidad: Propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón, tal que esta pueda ser relacionada con referencias determinadas generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas sus incertidumbres calculadas.

⁸ Equipo crítico: Todo equipo de medición y ensayo que tenga un efecto significativo sobre la incertidumbre de las mediciones o validez de los ensayos.

Políticas complementarias

- ⇒ Los agentes de evaluación de la conformidad acreditados por EMA deben tener una carta de trazabilidad completa actualizada con la cual muestren la trazabilidad de sus mediciones a patrones nacionales.
- ⇒ La certificación de sistemas de calidad no califica la competencia técnica para realizar calibraciones con la que se pretenda dar trazabilidad a algún resultado de medición.
- ⇒ Los laboratorios de calibración y/o ensayo acreditados por EMA no pueden realizar actividades de unidades de verificación si no cuentan con la aprobación y acreditación correspondiente.

Parte II

Casos especiales. Dado que en México el esquema de evaluación de la conformidad esta en desarrollo y se tienen áreas en las que no se cuenta con la infraestructura necesaria para cumplir las políticas de la parte I, se establecen cuatro casos especiales dentro de este documento.

Caso I

No hay patrones nacionales y no existen laboratorios de calibración acreditados. Para este caso se aplican las disposiciones del artículo 20 y 24 del reglamento de la ley Federal Sobre Metrología y Normalización.

Artículo 20.- La Secretaría podrá autorizar la trazabilidad a patrones nacionales o en su caso extranjeros que a su juicio sean confiables, atendiendo las razones que el solicitante exponga.

Para comprobar la trazabilidad se deberá presentar el documento que avale la calibración por un laboratorio que con trazabilidad a un laboratorio primario, ya sea nacional o extranjero y en el primer caso acreditado y aprobado.

Artículo 24.- La Secretaría y los laboratorios de calibración acreditados y aprobados integrarán cadenas de calibración para cada una de las magnitudes del sistema General de Unidades de Medida, mismas que deberán tener trazabilidad a patrones nacionales o en su caso a patrones extranjeros conforme a lo dispuesto en el artículo 20 del reglamento, salvo que no se cuente con un patrón nacional y se reconozca la trazabilidad a algún laboratorio primario extranjero con el que la secretaria haya celebrado un acuerdo de reconocimiento mutuo, o lo haya aprobado.

Políticas del caso I

Respecto a la trazabilidad a patrones nacionales.- En caso de que no exista patrón nacional, los agentes de evaluación de la conformidad deben presentar la

autorización de la trazabilidad a patrones extranjeros emitida por la Dirección General de Normas de la Secretaría de Economía y los informes de calibración tendrán que cumplir con todos los aspectos contenidos en los *lineamientos para la elaboración de dictámenes o informes de calibración*.

Respecto a la calibración de sus equipos y patrones.- Los agentes de evaluación de la conformidad que requieran calibrar un instrumento para el cual no hay un patrón nacional y tampoco exista un laboratorio acreditado para ello deben presentar la autorización de la Dirección General de Normas de la trazabilidad de su patrón de referencia a un patrón extranjero y realizar ellos mismos la calibración del instrumento siempre y cuando se acrediten para ello.

Caso II

Existe patrón nacional pero no es suficiente la capacidad de medición. Las políticas para este caso son iguales a las descritas para el caso I.

Caso III

No hay referencia al sistema Internacional ni directa ni indirectamente.

Políticas del caso III

Respecto a la trazabilidad a patrones nacionales o extranjeros.- Cuando existan mediciones de magnitudes que con los conocimientos actuales no puedan ser relacionadas a las unidades del SI no se solicitara la trazabilidad a patrones nacionales o extranjeros.

Respecto a la calibración de sus equipos y patrones.- En este caso la calibración de sus equipos de medición y de los patrones de calibración debe ser realizada por agentes de evaluación de la conformidad usando procedimientos técnicos validados.

Respecto a la incertidumbre de la medición.- En este caso la estimación de la incertidumbre debe ser realizada por agentes de evaluación de la conformidad con procedimientos técnicos validados.

Caso IV

No hay patrón de referencia con la incertidumbre requerida.

Política.

En este caso se exigirá la autorización a la Dirección General de Normas de la trazabilidad a algún patrón primario extranjero que satisfaga los requerimientos de incertidumbre solicitados.

Cuando no exista patrón extranjero primario no se exigirá trazabilidad a patrones primarios y extranjeros y no se exigirá la calibración a laboratorios acreditados, sin embargo deberá ser realizada bajo procedimientos técnicos validados y con la demostración de su capacidad técnica mediante su participación en comparaciones inter laboratorios de manera sistemática.

Política referente a las incertidumbres de las mediciones:

El conocimiento y la aplicación de la incertidumbre constituye una parte indisoluble en el resultado de una medición. Es un elemento indispensable en la trazabilidad de las mediciones. Es requerida también en la verificación de conformidad con especificaciones demostrables mediante resultados de mediciones

Política.

La incertidumbre de medición para cada paso de la cadena de trazabilidad debe ser estimada (a través de cálculos) de acuerdo a los métodos definidos en a norma NMX-CH-140-IMNC-2002 [6]. Cuando un sistema particular de medición quede fuera del alcance de esta norma, el laboratorio debe presentar un procedimiento detallado generalmente aceptado.

Estas incertidumbres deben estar soportadas matemáticamente y estarán representadas como incertidumbres expandidas usando un nivel de confianza de aproximadamente el 95% de confianza y un factor de cobertura correspondiente.

1.5 La evolución sobre estimación de incertidumbres

El concepto de incertidumbre como un atributo cuantificable es relativamente nuevo en la historia de las mediciones, aún cuando se manejaban el concepto de error y su análisis, actualmente se considera de manera general que cuando las componentes, conocidas o supuestas, del error han sido evaluadas y se han aplicado las correcciones, aún así existe una duda acerca de que tan bien representa el resultado de la medición al valor de la cantidad que está siendo medida.

En 1978 a reconocerse la falta de consenso alrededor de la expresión de las incertidumbres en las mediciones, la más alta autoridad en metrología en el mundo, el comité International des poids et mesures (CIPM) sugirió al Bureau

International des Poids et mesures (BIPM) que abordara el tema en conjunto con los laboratorios nacionales y que realizaran una recomendación.

El BIPM envió un cuestionario detallado que cubría los temas involucrados haciéndolo llegar a 32 laboratorios nacionales de metrología interesados en el tema. A principios de 1979 se recibieron las respuestas de 21 laboratorios. Casi todos estaban de acuerdo en que era importantes contar con un procedimiento aceptado internacionalmente para expresar las incertidumbres en las mediciones.

Sin embargo no se alcanzó un consenso acerca del método que debía ser utilizado. El BIPM convocó a una reunión con el propósito de diseñar un procedimiento uniforme y mayoritariamente aceptable para la estimación de las incertidumbres, en esta reunión asistieron expertos de 11 laboratorios nacionales.

Este grupo de trabajo generó la recomendación INC-1(1980), expresión de incertidumbres experimentales. El CIPM aprobó dicha recomendación en 1981 y la reafirmó en 1986.

La tarea de desarrollar una guía detallada basada en la recomendación del grupo de trabajo fue delegada por el CIPM en la International Organization for standardization (ISO). La responsabilidad fue asignada al grupo Asesor Técnico en Metrología (TAG 4) dado que una de sus tareas es coordinar el desarrollo de guías en tópicos de medición que son de interés común tanto para ISO como para seis organizaciones que colaboran en este trabajo:

- International Electrotechnical Commission (IEC)
- Comité International des poids et mesures (CIPM)
- International Organization of Legal Metrology (OIML)
- International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)
- International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP)
- International federation of clinical Chemistry (IFCC).

El TAG 4 estableció el grupo de trabajo 3 (ISO/TAG/WG 3) al cual se le asignaron los siguientes términos.

Desarrollar un documento guía basado en la recomendación del grupo de trabajo para la expresión de las incertidumbres del BIPM que proporcione reglas acerca de la expresión de las incertidumbres de tal forma que pueda ser usado en la normalización, calibración, acreditación de laboratorios y servicios de metrología.

En México a partir de la entrada en vigor de la Ley Federal Sobre Metrología y normalización [1] a los laboratorios de calibración se les exigió la estimación de las incertidumbres para garantizar la trazabilidad de los instrumentos que se calibran, estos laboratorios se basaron en la Guía Internacional para la Estimación de

Incertidumbres sus métodos de estimación ya que el enfoque estaba diseñado para mediciones en calibraciones.

Fue hasta la entrada en vigor de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2000 [9] que se hizo obligatorio para los laboratorios de ensayos la estimación de incertidumbre en sus correspondientes mediciones lo cual desencadenó una preocupación por como desarrollar un método para cada uno de los múltiples y variados métodos de ensayo existentes ya que no se había trabajado en ejemplos así de específicos tomando como base la Guía Internacional para la Estimación de Incertidumbres.

Esto ha llevado en la actualidad a realizar un gran esfuerzo para desarrollar los métodos de estimación que sean validos en el proceso de evaluación de un laboratorio con fines de acreditación.

Cabe mencionar que en abril del 2003 se emitió la norma mexicana NMX-CH-140-IMNC-2002 [6]. Guía para la expresión de las incertidumbres en las mediciones, documento que apoya este proceso pero no lo suficiente para facilitar al personal de los laboratorios el desarrollo de su método propio.

1.6 Experiencias previas sobre la estimación de incertidumbre en motores de inducción

En el mes de mayo del 2003 el Centro Nacional de Metrología presento al grupo de trabajo de laboratorios en el área de eléctrica una metodología para estimar las incertidumbres asociadas a la eficiencia energética de los motores de corriente alterna, monofásicos de inducción tipo jaula de ardilla, el desarrollo de la metodología presentada es la siguiente:

1.- Se identifica el modelo matemático de la eficiencia asociada a los motores de inducción monofásicos tipo jaula de ardilla.

$$\eta_m = \frac{P_s}{P_e} \quad A$$

donde:

P_s es la Potencia de salida corregida a la potencia nominal, en kW

P_e es la Potencia de entrada a la potencia nominal, en kW

2.- La potencia de salida corregida se obtiene:

$$P_s = \frac{n_m(T_m + FCD)}{9549} \quad B$$

donde:

n_m es la frecuencia de rotación medida a la potencia nominal, en min-1

T_m es el Par torsional medido en el eje del motor a su potencia nominal, en N·m

FCD Es el Factor de corrección del dinamómetro, en N·m

3.- Se sustituye el valor de la presión de salida corregida en la Ec. A

$$\eta_m = \frac{n_m (T_m + FCD)}{9549 P_e} \quad C$$

4.- Considerando el factor de corrección del dinamómetro que se obtiene:

$$FCD = \frac{9549 P_{min} (1 - S_{min})}{n_{min}} - \frac{9549 P_0}{n_0} - T_{min} \quad D$$

donde:

P_{min} es la Potencia de entrada con el dinamómetro a su carga mínima, en kW

S_{min} Deslizamiento en por unidad de la frecuencia de rotación síncrona, con el dinamómetro a su carga mínima

T_{min} Par torsional medido en el eje del motor con el dinamómetro a su carga mínima, en N·m

n_{min} Es Frecuencia de rotación con el dinamómetro a su carga mínima, en min-1

P_0 Potencia de entrada con el motor operando en vacío, en kW

n_0 Frecuencia de rotación síncrona en vacío, en min-1

5.- Sustituyendo la ec. D en ec. C

$$\eta_m = \frac{n_m}{9549 P_e} \left\{ T_m + 9549 \left[\frac{P_{min} (1 - S_{min})}{n_{min}} - \frac{P_0}{n_0} \right] - T_{min} \right\} \quad E$$

donde:

n_m es la frecuencia de rotación medida a la potencia nominal, en min-1

P_e es la Potencia de entrada a la potencia nominal, en kW

T_m es el Par torsional medido en el eje del motor a su potencia nominal, en N·m

P_{min} es la Potencia de entrada con el dinamómetro a su carga mínima, en kW

S_{min} Deslizamiento en por unidad de la frecuencia de rotación síncrona, con el dinamómetro a su carga mínima

n_0 Frecuencia de rotación síncrona en vacío, en min-1

P_0 Potencia de entrada con el motor operando en vacío, en kW

T_{min} Par torsional medido en el eje del motor con el dinamómetro a su carga mínima, en N·m

n_{min} Es Frecuencia de rotación con el dinamómetro a su carga mínima, en min-1

6.- Además se tiene que:

$$S_{min} = \frac{n_s - n_{min}}{n_s} \quad F$$

donde:

n_s Frecuencia de rotación síncrona, en min-1

n_{min} Es Frecuencia de rotación con el dinamómetro a su carga mínima, en min-1

7.- Sustituyendo ec. F en ec. E y factorizando se obtiene.

$$\eta_m = \frac{n_m(T_m - T_{min})}{9549 Pe} + \frac{n_m}{Pe} \left[\frac{P_{min}(1 - S_{min})}{n_{min}} - \frac{P_0}{n_0} \right] \quad G$$

donde:

n_m es la frecuencia de rotación medida a la potencia nominal, en min-1

Pe es la Potencia de entrada a la potencia nominal, en kW

T_m es el Par torsional medido en el eje del motor a su potencia nominal, en N·m

P_{min} es la Potencia de entrada con el dinamómetro a su carga mínima, en kW

S_{min} Deslizamiento en por unidad de la frecuencia de rotación síncrona, con el dinamómetro a su carga mínima

n_0 Frecuencia de rotación síncrona en vacío, en min-1

P_0 Potencia de entrada con el motor operando en vacío, en kW

T_{min} Par torsional medido en el eje del motor con el dinamómetro a su carga mínima, en N·m

n_{min} Es Frecuencia de rotación con el dinamómetro a su carga mínima, en min-1

8.- Por lo tanto la eficiencia se obtiene por el siguiente modelo matemático.

$$\eta_m = \frac{n_m}{P_e} \left[\frac{(T_m - T_{min})}{9549} + \frac{P_{min}}{n_s} - \frac{P_0}{n_0} \right] \quad H$$

donde:

n_m es la frecuencia de rotación medida a la potencia nominal, en min-1

Pe es la Potencia de entrada a la potencia nominal, en kW

T_m es el Par torsional medido en el eje del motor a su potencia nominal, en N·m

P_{min} es la Potencia de entrada con el dinamómetro a su carga mínima, en kW

n_0 Frecuencia de rotación síncrona en vacío, en min-1

P_0 Potencia de entrada con el motor operando en vacío, en kW

T_{min} Par torsional medido en el eje del motor con el dinamómetro a su carga mínima, en N·m

n_s Frecuencia de rotación síncrona, en min-1

9.- Para encontrar la incertidumbre se parte de la relación funcional.

$$\eta_m = f(n_m, P_e, T_m, T_{min}, P_{min}, n_s, P_0, n_0)$$

10.- Por lo tanto el siguiente paso es derivar parcialmente el modelo matemático en función de cada una de las variables independientes, cada una de estas derivadas parciales también se les llama coeficientes de sensibilidad.

$$\frac{\partial \eta_m}{\partial n_m} = \frac{1}{P_e} \left[\frac{(T_m - T_{min})}{9549} + \frac{P_{min}}{n_s} - \frac{P_0}{n_0} \right] \quad \text{I}$$

$$\frac{\partial \eta_m}{\partial P_e} = -\frac{n_m}{P_e^2} \left[\frac{(T_m - T_{min})}{9549} + \frac{P_{min}}{n_s} - \frac{P_0}{n_0} \right] \quad \text{J}$$

$$\frac{\partial \eta_m}{\partial T_m} = \frac{n_m}{P_e 9549} \quad \text{K}$$

$$\frac{\partial \eta_m}{\partial T_{min}} = -\frac{n_m}{9549 P_e} \quad \text{L}$$

$$\frac{\partial \eta_m}{\partial P_{min}} = \frac{n_m}{n_s P_e} \quad \text{M}$$

$$\frac{\partial \eta_m}{\partial P_0} = -\frac{n_m}{P_e n_0} \quad \text{N}$$

$$\frac{\partial \eta_m}{\partial n_0} = -\frac{n_m P_0}{P_e n_0^2} \quad \text{O}$$

Para encontrar la incertidumbre combinada de la eficiencia se tiene.

$$U_{\eta_m} = c_1^2 U_{n_m}^2 + c_2^2 U_{P_e}^2 + c_3^2 U_{T_m}^2 + c_4^2 U_{P_{min}}^2 + c_5^2 U_{T_{min}}^2 + c_6^2 U_{P_0}^2 + c_7^2 U_{n_0}^2 \quad \text{P}$$

Sin embargo, debido a las diferencias entre los métodos de ensayo, ésta metodología no puede ser empleada para estimar la incertidumbre asociada a la eficiencia energética de los motores de inducción trifásicos tipo jaula de ardilla, a los que se refiere ésta tesis.

1.7 Cumplimiento de Normas Oficiales Mexicanas (NOM).

La Normalización es el proceso mediante el cual se regulan las actividades desempeñadas por los sectores tanto privado como público, en materia de salud, medio ambiente en general, seguridad al usuario, información comercial, prácticas de comercio, industrial y laboral a través del cual se establecen la terminología, la clasificación, las directrices, las especificaciones, los atributos las características, los métodos de prueba o las prescripciones aplicables a un producto, proceso o servicio.

De acuerdo a la Ley Federal Sobre Metrología y Normalización, las normas se clasifican en:

- ⇒ Normas oficiales mexicanas (NOM)
- ⇒ Normas mexicanas(NMX)
- ⇒ Normas de referencia (NR)
- ⇒ Normas Internacionales (NI)

Dentro de todos estos tipos de normas la Norma Oficial Mexicana en nuestro país es la mas importante y se define como la regulación técnica de observancia obligatoria expedida por las dependencias normalizadoras competentes a través de sus respectivos Comités Consultivos Nacionales de Normalización, de conformidad con las finalidades establecidas en el artículo 40 de la Ley Federal Sobre Metrología y Normalización (LFMN), establece reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado y las que se le refieran a su cumplimiento o aplicación.

La importancia de que los motores de inducción trifásicos tipo jaula de ardilla fabricados o importados por México cumplan con Normas Oficiales Mexicanas genera la necesidad de realizar pruebas para verificar el cumplimiento de los requisitos, en este caso en particular las especificaciones de los motores y los métodos de prueba para verificar su cumplimiento se establecen en la norma oficial mexicana NOM-016-ENER-2002, *Eficiencia energética de motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, en potencia nominal de 0,746 a 373 kW. Límites, método de prueba y marcado.*

Es fundamental que las pruebas realizadas bajo los lineamientos de esta norma se cumplan, de tal forma que fundamente en su momento la certificación del producto dándole un sello de calidad.

Capítulo II

Marco teórico.

El marco teórico que se presenta en este capítulo consta de dos partes. La primera está enfocada a describir la metodología de ensayo para obtener la eficiencia energética de los motores de inducción trifásicos tipo jaula de ardilla de acuerdo con la norma NOM-016-ENER-2002 [3]. La segunda parte establece los fundamentos sobre la estimación de la incertidumbre de acuerdo con la Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones NMX-CH-140-IMNC-2002 [6].

Primera Parte

2.1 Metodología de ensayo

2.1.1 Método de prueba para la determinación de la eficiencia energética

De acuerdo con la norma de referencia NOM-016-ENER-2002, la eficiencia energética de todos los motores de inducción trifásicos tipo jaula de ardilla⁹ a que se refiere esta tesis, se prueban por el método de las pérdidas segregadas.

En este método, a partir de mediciones y cálculos, se determinan las pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator y del rotor, así como las pérdidas del núcleo y las pérdidas por fricción y ventilación; al final, las pérdidas indeterminadas se obtienen por diferencias, como se describe más adelante en el apartado: Cálculo de la potencia de salida a 25 °C. Los criterios de aceptación para la eficiencia determinada se establecen en el anexo 1.

La prueba se realiza en las siguientes etapas:

- a) condiciones de prueba
- b) procedimiento de prueba y registro de datos
- c) segregación de pérdidas
- d) determinación de la eficiencia

2.1.2 Condiciones de la prueba

Los motores se deben de probar en posición horizontal.

⁹ Es un motor de inducción, en el cual los conductores del rotor son barras colocadas en las ranuras del núcleo secundario, que se conectan en circuito corto por medio de anillos en sus extremos semejando una jaula de ardilla.

La frecuencia eléctrica de alimentación para todas las pruebas debe ser la frecuencia eléctrica nominal que se indica en la placa de datos del motor con una variación de $\pm 0,5\%$.

La tensión eléctrica de corriente alterna de alimentación para la prueba, debe ser la tensión eléctrica nominal indicada en la placa de datos del motor, medida en sus terminales, sin exceder una variación de $\pm 0,5\%$, con un desbalance máximo permitido de $\pm 0,5\%$. El por ciento de desbalance es igual a 100 veces la desviación máxima de la tensión eléctrica de cada fase con respecto a la tensión eléctrica promedio, dividida entre la tensión eléctrica promedio.

2.1.3 Instrumentos de medición y equipo de prueba

Los instrumentos de medición deben seleccionarse para que el valor leído esté dentro del intervalo de la escala recomendado por el fabricante del instrumento, o en su defecto en el tercio superior de la escala del mismo.

Los instrumentos analógicos o digitales deben estar calibrados con una incertidumbre máxima de $\pm 0,5\%$ de plena escala.

Los instrumentos de medición, equipos y aparatos para aplicar este método de prueba son los siguientes:

- ⇒ detectores de temperatura por resistencia o termopares;
- ⇒ óhmetro a cuatro terminales, para medir resistencias bajas;
- ⇒ equipo para controlar la tensión de alimentación;
- ⇒ frecuencímetro;
- ⇒ voltímetros;
- ⇒ amperímetros;
- ⇒ wáttmetro trifásico;
- ⇒ dinamómetro;
- ⇒ torsiómetro o aparato para medir par torsional;
- ⇒ tacómetro, y
- ⇒ cronómetro.

2.1.4 Procedimiento de prueba

Antes de comenzar las pruebas se deben registrar la temperatura y la resistencia óhmica de los devanados del estator. Para ello, se deben instalar dentro del motor, como mínimo, dos detectores de temperatura por resistencia o termopares, entre o sobre cada uno de los cabezales del devanado, o en las ranuras del núcleo del estator, procurando que queden fuera de las trayectorias del aire de enfriamiento del motor.

Parámetros iniciales:

Se miden las resistencias entre terminales de los devanados del estator y la temperatura correspondiente.

Se registran los siguientes parámetros:

- 1) Las resistencias entre terminales de los devanados del estator, en Ohm;
- 2) El promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator \bar{t}_i , en °C,
- 3) La temperatura ambiente t_{amb} , en °C.

Se designa como resistencia de referencia R_i , a aquella con el valor más cercano al promedio de las tres registradas.

Prueba para alcanzar el equilibrio térmico¹⁰:

Mediante esta prueba se determinan la resistencia y temperatura de los devanados del motor operando a carga plena.

Se hace funcionar el motor a su régimen nominal hasta alcanzar el equilibrio térmico en todos los detectores de temperatura. Se desenergiza y se desconectan las terminales de línea del motor, se mide y registra la resistencia entre las mismas terminales empleadas para establecer la resistencia de referencia determinada (R_i), en el tiempo especificado en la siguiente tabla.

¹⁰ Equilibrio térmico a carga plena: Cuando la diferencia entre la temperatura del motor y la temperatura ambiente no excede de 1°C, en un lapso de 30 min trabajando a carga plena.

Potencia Nominal, en kW	Tiempo [s]
37,5 o menor	30
Mayor de 37,5 a 150	90
mayor de 150	120

TABLA 1.- Tiempo al cual se debe realizar la medición de la resistencia de referencia de los devanados del estator

Si se excede el tiempo establecido en la Tabla 1, se traza una curva de enfriamiento basada en la resistencia entre el par de terminales de referencia, utilizando por lo menos 10 valores espaciados a intervalos de 30 s, para determinar la resistencia al tiempo de retardo especificado en la misma Tabla .

Si los tiempos especificados en la tabla anterior se exceden en más del doble para el registro de la primera lectura, se anula y se repite la prueba.

Se miden y registran:

- 1) La resistencia entre las terminales de referencia, R_f , en ohm;
- 2) El promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator, $\bar{t}_{f, t}$, en °C;
- 3) La temperatura ambiente, t_{af} , en °C, y
- 4) El tiempo al que se midió o determinó la resistencia R_f , en s.

Prueba de funcionamiento:

Al término de la prueba anterior, se hace funcionar el motor a su tensión eléctrica medida en sus terminales, frecuencia eléctrica y potencia nominales, hasta alcanzar nuevamente el equilibrio. Se aplican en forma descendente dos valores de carga arriba de la potencia nominal¹¹, 130% y 115%; así como cuatro valores de carga al 100%, 75%, 50% y 25% de la potencia nominal, con una tolerancia de 2%.

Se miden y registran los siguientes parámetros para cada uno de los valores de carga:

¹¹ Valor indicado en la placa de datos del motor

- 1) El promedio de las tensiones eléctricas entre terminales, en \bar{V} ;
- 2) Frecuencia eléctrica de alimentación, en Hz ;
- 3) El promedio de las corrientes eléctricas de línea, \bar{I}_m , en A ;
- 4) La potencia de entrada, P_e , en kW
- 5) El par torsional del motor, T_m , en $N \cdot m$;
- 6) La frecuencia de rotación, n_m , en mir^{-1} ;
- 7) El promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator para cada valor de carga, t_m , en $^{\circ}C$, y
- 8) La temperatura ambiente para cada valor de carga, t_{am} , en $^{\circ}C$.

Carga mínima posible en el dinamómetro:

Se ajusta el dinamómetro a su carga mínima y se opera el motor a su tensión eléctrica medida en sus terminales y frecuencia eléctrica nominales hasta que la potencia de entrada no varíe más del 3% en un lapso de 30 min.

Con la potencia de entrada estabilizada a la carga mínima del dinamómetro, se miden y registran:

- 1) El promedio de las tensiones eléctricas entre terminales, en V ;
- 2) La frecuencia eléctrica de alimentación, en Hz ;
- 3) El promedio de las corrientes eléctricas de línea, $I_{mín}$, en A ;
- 4) La potencia de entrada, $P_{mín}$, en kW ;
- 5) El par torsional del motor, $T_{mín}$, en $N \cdot m$;
- 6) La frecuencia de rotación, $n_{mín}$, en mir^{-1} ;
- 7) El promedio de las temperaturas detectadas por los detectores de temperatura de los devanados, $t_{mín}$, en $^{\circ}C$, y

Prueba de operación en vacío:

Se desacopla el motor del dinamómetro y se opera en vacío a su tensión eléctrica medida en las terminales del motor y frecuencia eléctrica nominales hasta que la potencia de entrada varíe no más del 3% en un lapso de 30 min. Se aplican en forma descendente tres o más valores de tensión eléctrica entre el 125% y el 60% de la tensión eléctrica nominal, espaciados en forma regular; de la misma manera,

tres o más valores entre el 50% y el 20% de la tensión eléctrica nominal o hasta donde la corriente eléctrica de línea llegue a un mínimo o se haga inestable.

Para cada valor de tensión eléctrica, se miden y registran:

- 1) El promedio de las tensiones eléctricas entre terminales, en V ;
- 2) La frecuencia eléctrica de alimentación, en Hz ;
- 3) El promedio de las corrientes eléctricas de línea, I_0 , en A ;
- 4) La potencia de entrada en vacío, P_0 , en kW ;
- 5) La frecuencia de rotación, n_{0r} , en min^{-1} , y
- 6) El promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator en cada valor de tensión, t_{0r} , en $^{\circ}C$.

2.1.5 Segregación de pérdidas

Determinación de las pérdidas por fricción y ventilación y cálculo de las pérdidas en el núcleo.

Los siguientes cálculos se utilizan para separar el origen de las pérdidas en vacío.

- 1) Se resta de la potencia de entrada en vacío P_0 , medida en el inciso 4 anterior, las pérdidas de los devanados del estator $I_0^2 R_{E0}$ para cada valor de tensión eléctrica del punto anterior, calculadas con la siguiente ecuación:

$$I_0^2 R_{E0} = 0,0015 \cdot I_0^2 \cdot R_{E0} \quad [kW]$$

donde:

I_0 Es el promedio de las corrientes eléctricas de línea en vacío, en A , y

R_{E0} es la resistencia entre las terminales de referencia, en ohm, corregida al promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator para cada valor de tensión eléctrica, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R_{E0} = R_i \cdot \frac{t_0 + K}{t_i + K} \quad [\Omega]$$

donde:

R_i es la resistencia de referencia, en ohm;

t_0 es el promedio de las temperaturas de los devanados para cada valor de tensión el inciso, en $^{\circ}C$;

t_i es el promedio de las temperaturas de los devanados del estator en frío, en $^{\circ}C$, y

- K es la constante del material y es igual a 234,5 para el cobre puro. Para otros materiales en los devanados, deberá usarse el valor especificado por el fabricante del material.
- 2) Se traza una curva con la potencia de entrada con el motor operando en vacío P_0 menos las pérdidas en los devanados del estator $I^2 R_{EO}$ contra la tensión eléctrica en vacío, para cada valor de tensión eléctrica entre el 125% y el 60% del valor nominal.
 - 3) Se traza una curva con los valores de potencia de entrada en vacío P_0 menos las pérdidas en los devanados del estator $I^2 R_{EO}$, contra el cuadrado de la tensión eléctrica, para cada valor de tensión eléctrica entre el 50% y el 20% del valor nominal o hasta el valor correspondiente a la corriente eléctrica de línea mínima o inestable. Se extrapola la curva a la tensión eléctrica en vacío igual a cero. El valor de la potencia de entrada en este punto corresponde a las pérdidas por fricción y ventilación P_{fv} .
 - 4) De la curva obtenida en el inciso (2), se calculan las pérdidas del núcleo, P_h , a la tensión eléctrica nominal, restando de la potencia de entrada en vacío, P_0 , las pérdidas en los devanados del estator $I^2 R_{EO}$ según el inciso (1), y las pérdidas de fricción y ventilación P_{fv} según el inciso (3).

2.1.6 Corrección por temperatura para las pérdidas por efecto joule:

Cálculo de las pérdidas por efecto Joule en el estator:

Se calculan las pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator $I^2 R_m$ para cada uno de los seis valores de carga aplicados según el inciso, utilizando la siguiente ecuación:

$$I^2 R_m = 0,0015 \cdot I_m^2 \cdot R_m \quad [\text{kW}]$$

donde:

I_m es el promedio de las corrientes de línea del inciso, en A;

R_m es la resistencia entre las terminales de referencia del estator, inciso corregida a la temperatura de los devanados para cada valor de carga mediante la siguiente ecuación:

$$R_m = R_i \cdot \frac{t_m + K}{t_i + K} \quad [\Omega]$$

donde:

R_i es la resistencia de referencia, en ohm;

- t_m es el promedio de las temperaturas de los devanados por cada valor de carga, en °C;
- t_i es el promedio de las temperaturas de los devanados del estator del inciso, en °C, y
- K es la constante del material y es igual a 234,5 para el cobre puro. Para otros materiales en los devanados, deberá usarse el valor especificado por el fabricante.

Cálculo de las pérdidas por efecto Joule en el rotor:

Se calculan las pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor $I^2 R_r$, en cada uno de los seis valores de carga aplicados según el inciso utilizando la siguiente ecuación:

$$I^2 R_r = (P_e - I^2 R_m - P_h) \cdot S_m \quad [kW]$$

donde:

- P_e es la potencia de entrada para cada valor de carga medida
- P_h son las pérdidas del núcleo calculadas
- S_m es el deslizamiento en por unidad de la frecuencia de rotación síncrona n_s para cada valor de carga, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$S_m = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

donde:

- n_s es la frecuencia de rotación síncrona en min^{-1} , y
- n_m es la frecuencia de rotación para cada valor de carga medida en min^{-1} .

2.1.7 Cálculo de la potencia de salida a 25 °C:

Se calcula la potencia de salida corregida a la temperatura ambiente de 25 °C, para cada uno de los seis valores de carga del inciso usando la siguiente ecuación:

$$P_{sc} = P_e - P_h - P_{fv} - P_{ind} - I^2 R_{mc} - I^2 R_{rc} \quad [kW]$$

donde:

- P_{sc} Potencia de salida corregida para cada punto de carga, referido a una temperatura ambiente de 25 °C, en kW
- P_e es la potencia de entrada para cada valor de carga medida
- P_h Pérdidas en el núcleo, en kW
- P_{fv} Pérdidas por fricción y ventilación, en kW
- P_{ind} Pérdidas indeterminadas, en kW
- $I^2 R_{mc}$ Pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator para cada punto de carga, referidas a una temperatura ambiente de 25°C, en kW

I^2R_c Pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor para cada punto de carga, referidas a una temperatura ambiente de 25°C en kW

2.1.8 Cálculo de la eficiencia

Se calcula la eficiencia η_m para cada uno de los seis valores de carga del inciso usando la siguiente ecuación:

$$\eta_m = \frac{P_{sc}}{P_o} \quad [\%]$$

donde:

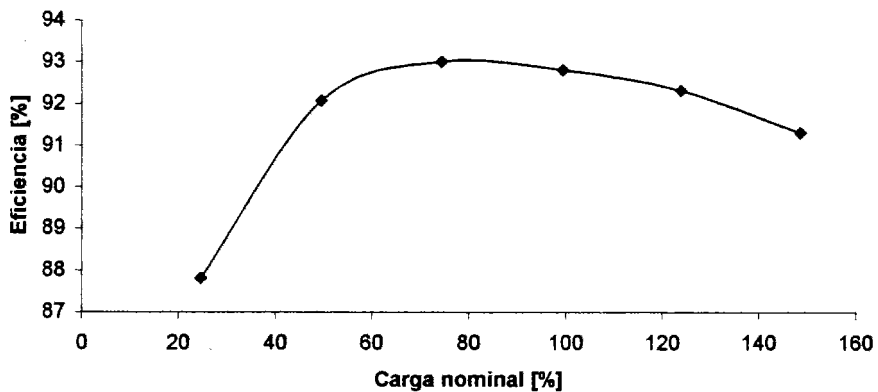
P_{sc} Potencia de salida corregida para cada punto de carga, referida a una temperatura ambiente de 25 °C, en kW

2.1.9 Eficiencia en cualquier punto de carga

Para determinar la eficiencia en algún valor de carga requerido, se traza una curva de carga aplicado al motor sobre el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas la eficiencia en obtenida. Ej. Para los siguientes valores experimentales:

	%					
Carga:	148,58	123,78	99,41	74,44	49,49	24,67
Eficiencia:	91,30	92,31	92,81	93,00	92,07	87,81

La grafica correspondiente es:



Gráfica 1. Relación entre carga y eficiencia

Segunda parte

2.2 Incertidumbres en las mediciones

Es natural que al realizar mediciones, estas no sean perfectas, por lo tanto es imposible conocer con certeza absoluta el valor verdadero de la característica sujeta a medición, por ello toda medición lleva implícita una incertidumbre que se define de la siguiente manera:

2.2.1 Concepto de incertidumbre (NMX-Z-55-IMNC-1997).

La incertidumbre es el parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían atribuirse razonablemente al mensurando¹²:

$$\text{Resultado} = \text{Valor medido} \pm \text{incertidumbre}$$

También se puede definir como el intervalo de duda asociado al resultado de una medición.

2.2.2 Evaluación de la incertidumbre estándar

El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación estándar (o un múltiplo de ésta) o la mitad de un intervalo correspondiente a un nivel de confianza establecido (ver anexo 2).

2.2.3 Modelo de la medición.

Un fenómeno físico generalmente se representa por un modelo descrito con lenguaje matemático.

Considerando a la medición como un proceso, se identifican magnitudes de entrada representadas por el conjunto de variables X_i . Donde $i=1$ hasta n .

El valor del mensurando (Y) depende de estas magnitudes de entrada por medio de una relación funcional.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

¹² El mensurando se define como el atributo sujeto a medición de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente. (ej. La temperatura de un líquido, la longitud de una barra, etc.)

Entonces la mejor estimación del valor del mensurando depende de realizar la mejor estimación de cada magnitud de entrada.

2.2.4 Identificación de las fuentes de incertidumbre.

Éstas provienen de los diversos factores involucrados en la medición como:

- ⇒ Los resultados de la calibración del instrumento;
- ⇒ La incertidumbre del patrón o del material de referencia;
- ⇒ La repetibilidad de las lecturas;
- ⇒ La reproducibilidad de las mediciones;
- ⇒ Características del instrumento como: resolución, histéresis, deriva, etc.
- ⇒ Variaciones de las condiciones ambientales;
- ⇒ Definición del propio mensurando
- ⇒ El modelo particular de la medición
- ⇒ Variaciones de las magnitudes de influencia tales como temperatura ambiente, presión barométrica y humedad.

2.2.5 Incertidumbre Tipo A

Es la incertidumbre evaluada a través del análisis estadístico de una serie de observaciones. Es la incertidumbre que se puede obtener al realizar mediciones repetidas en un punto deseado.

Estadísticamente entre más lecturas tomadas mayor confiabilidad en el resultado obtenido.

Para estimar este tipo de incertidumbre se requiere:

- a) Realizar mediciones repetidas
- b) Calcular sus estadísticos para su descripción (ver anexo 2)

1. Determinar el valor promedio de las mediciones realizadas.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

2. Determinar la desviación estándar experimental para evaluar la dispersión de las mediciones.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

3. Obtener la incertidumbre tipo A

$$U_A = \frac{S}{\sqrt{n}} * t$$

Donde:

- S es la desviación estándar de las lecturas
- t es el factor de corrección de student utilizado cuando el número de lecturas es menor a 10.
- n es el número de lecturas observadas.

No se puede dar una recomendación general para un número ideal de repeticiones n [4], ya que éste depende de las condiciones y exigencias (meta para la incertidumbre) de cada medición específica. Hay que considerar que:

- ⇒ Aumentar el número de repeticiones resulta en una reducción de la incertidumbre tipo A, la cual es proporcional a 1/Raíz de n
- ⇒ Un número grande de repeticiones aumenta el tiempo de medición, que puede ser contraproducente, si las condiciones ambientales u otras magnitudes de entrada no se mantienen constantes en este tiempo.
- ⇒ En pocos casos se recomienda o se requiere n mayor de 10 por ejemplo cuando se caracterizan instrumentos o patrones, o se hacen mediciones o calibraciones de alta exactitud.

Otras fuentes de incertidumbre que se evalúan por este método son la reproducibilidad que se evalúa con la varianza y las obtenidas al hacer una regresión lineal evaluada con este mismo parámetro en forma particular como se muestra a continuación:

Se parte de la ecuación de la recta:

$$y(x) = a_0 + a_1 x$$

Para obtener la incertidumbre de los parámetros a_0 (ordenada) y a_1 (pendiente de la recta) se obtiene la incertidumbre estadística en el conjunto de mediciones y_1, \dots, y_n de la siguiente manera:

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2}{n-2}}$$

Por lo tanto las incertidumbres de a_0 y a_1 están cuantificadas por las desviaciones estándar del promedio:

$$S_{a_0}^2 = \frac{S_y \sum x_i^2}{N \sum x_i^2 - (\sum x)^2}$$

$$S_{a_1}^2 = \frac{NS_y^2}{N \sum x_i^2 - (\sum x)^2}$$

2.2.6 Evaluación de la incertidumbre tipo B

Es la incertidumbre obtenida a través del método de observación o evaluación por medios diferentes del análisis estadístico de una serie de observaciones.

Las fuentes de incertidumbres tipo B son cuantificadas usando información externa u obtenida por experiencia. Estas fuentes de información pueden ser:

- ⇒ Certificados de calibración
- ⇒ Manuales de instrumentos de medición, especificaciones del instrumento.
- ⇒ Normas o literatura.
- ⇒ Valores de mediciones anteriores
- ⇒ Conocimiento sobre las características o el comportamiento del sistema de medición.

La forma mas común de evaluar una incertidumbre de este tipo es utilizando la que viene expresada en los informes de calibración de los instrumentos utilizados para medir al realizar los ensayos (ya que generalmente deben estar calibrados), este parámetro es una fuente de incertidumbre y la forma de obtenerla es:

$$U_B = \frac{U_{\text{informe}}}{k}$$

Donde:

- U_{informe} Es la incertidumbre expresada en el informe de calibración.
- k es el factor de cobertura, cuando la incertidumbre viene expresada con un nivel de confianza o factor multiplicativo.

Cuando no se tiene el dato de incertidumbre expresada en el informe de calibración, otras formas de obtener la incertidumbre tipo B pueden ser a partir de:

- ⇒ Resolución del instrumento de medición,

- ⇒ Desfasamiento de la temperatura ambiente con respecto a la temperatura de referencia,
- ⇒ Histéresis, etc.

Es estos casos la forma de caracterizar la incertidumbre es asociando una distribución rectangular geométrica (ver anexo 2), en estos casos la incertidumbre se caracteriza.

- a) para incertidumbre asociada a la resolución se utiliza el siguiente modelo

$$U_R = \frac{R}{2\sqrt{3}}$$

Donde:

R es la resolución del instrumento de medición
 $\sqrt{3}$ se es equivalente a 1s ver anexo

- b) Para incertidumbre asociada al desfasamiento de temperatura.

$$U_B = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

donde: $a = \alpha * \Delta t * L$

- c) Para obtener la incertidumbre asociada a la histéresis

$$U_H = \frac{e_H}{\sqrt{3}}$$

donde $e_H = |L_{ascendente} - L_{descendente}|$

2.2.7 Determinación de la incertidumbre estándar combinada

Este tipo de incertidumbre se obtiene aplicando la ley de propagación de incertidumbres que se expresa de la siguiente manera:

$$U_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 U_{x_i}^2$$

Donde:

- f es la función $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
 U_{x_i} es la incertidumbre correspondiente a cada una de las variables independientes X_i que pueden ser evaluadas como tipo A o tipo B

Las derivadas parciales $\partial f / \partial x_i$ son llamadas frecuentemente coeficientes de sensibilidad y describen cómo varía la estimación Y (magnitud de salida) con los cambios en las estimaciones de las magnitudes x_i (magnitudes de entrada), o dicho de otra manera: El coeficiente de sensibilidad describe, que tan sensible es el mensurando con respecto a las variaciones de la magnitud de entrada correspondiente.

2.2.8 determinación de la incertidumbre expandida

La forma de expresar la incertidumbre como parte de los resultados de la medición depende de la conveniencia del usuario. A veces se informa simplemente como la incertidumbre estándar combinada, otras ocasiones como un cierto número de veces tal incertidumbre, algunos casos requieren se exprese en términos de un nivel de confianza dado, etc. En cualquier caso, es indispensable declarar sin ambigüedades la manera en que la incertidumbre es expresada.

La incertidumbre estándar U_c representa un intervalo centrado en la mejor estimación del mensurando que contiene el valor verdadero con una probabilidad p de 68% aproximadamente, bajo la suposición de que los posibles valores del mensurando siguen una distribución normal.

Generalmente se desea una probabilidad mayor, lo que se obtiene expandiendo el intervalo de incertidumbre por un factor k , llamado factor de cobertura. El resultado se llama incertidumbre expandida.

Esta incertidumbre indica un intervalo que representa una fracción p de los valores que puede probablemente tomar el mensurando. El valor de p es llamado el nivel de confianza y puede ser elegido a conveniencia.

$$U = k * U_c$$

2.2.9 Elección del factor de cobertura

En el medio industrial a menudo se elige el nivel de confianza de manera tal que corresponda a un factor de cobertura como un número entero de desviaciones estándar en una distribución normal, por ejemplo, en una distribución normal:

$K=1$ Corresponde a $p=68,27\%$
 $K=2$ Corresponde a $p=95,45\%$
 $K=3$ Corresponde a $p=99,73\%$

2.2.10 Aplicación de la incertidumbre

Mientras la incertidumbre de la medición obtenida nos refleja la falta de conocimiento que tenemos del resultado; por otro lado las tolerancias o errores máximos permitidos, se establecen para el proceso de medición.

La forma en que se relaciona a la incertidumbre con la tolerancia es cuando se realizan lecturas con el propósito de obtener un valor determinado sujetos a tolerancias.

Si tenemos el valor de referencia o lectura objetivo en un proceso de medición " L " y asociada a ella existe una tolerancia " T ", nuestra lectura está entonces afectada por la tolerancia de la siguiente manera:

$$X = L \pm T \quad L - T < x < L + T$$

Lo anterior se puede visualizar de la siguiente manera:

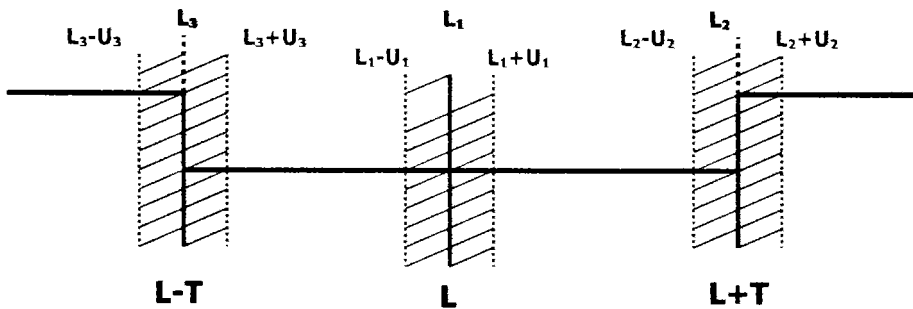


Fig. 2. relación de la incertidumbre con la tolerancia

Donde:

- L Valor de referencia
- T Tolerancia
- L_i Lectura obtenida en la medición
- U_i Incertidumbre asociada a L_i

Por lo tanto, debemos asumir una zona de nuestro intervalo donde las mediciones sean aceptables, dicho de otra manera, donde se pueda leer con nuestro instrumento sin que las lecturas salgan de los límites establecidos al considerar las incertidumbres; esto es, identificar una zona de aceptación como se ilustra en la fig. 3.

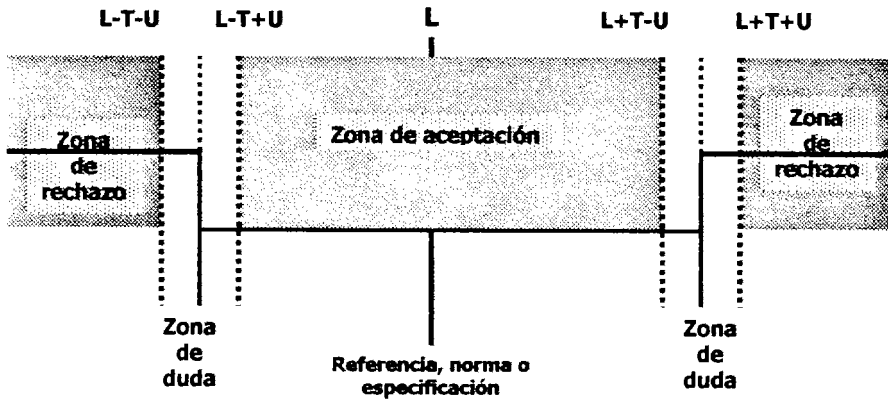


Fig. 3. identificación de la zona de aceptación

Capítulo III

Metodología.

La metodología que presenta a continuación se puede resumir en cinco etapas:

1. Observación del desarrollo de la prueba para obtención de la eficiencia energética.
2. Revisión exhaustiva de la información involucrada.
3. Análisis del tipo de medición y modelo matemático de la eficiencia.
4. Obtención de la expresión de incertidumbre combinada de cada fuente.
5. Obtención de la expresión de la incertidumbre expandida.

El objetivo final de ésta metodología es poner a la disposición una expresión matemática fundamentada que nos permita estimar la incertidumbre asociada al resultado de medición de la eficiencia energética en motores de corriente alterna trifásicos y que considere todas las fuentes que le afectan de manera significativa, es decir una expresión de incertidumbre combinada con un intervalo de confianza (ver anexo 2) a la cual se le llama comúnmente expandida. Enseguida se detallan las etapas.

3.1 Observación del desarrollo de la prueba para obtención de la eficiencia energética.

El conocimiento del método de prueba y la observación de la ejecución de la prueba misma, es muy importante porque nos permite observar las variables de influencia (fuentes de incertidumbre) como el modelo matemático aplicable para la obtención de la eficiencia, el desarrollo de la prueba se describe en el capítulo III Marco teórico.

3.2 Revisión exhaustiva de la información involucrada.

De acuerdo con la observación de la prueba se procedió a revisar los siguientes documentos en orden de importancia:

- ⇒ El apego de las actividades observadas al método de prueba documentado.
- ⇒ Norma Oficial Mexicana NOM-016-ENER-2002 en donde se especifica el método de prueba, verificando la concordancia con el método de prueba documentado,
- ⇒ Informe de calibración de los equipos involucrados en las mediciones de la prueba, con su correspondiente reporte de incertidumbre

- ⇒ Las especificaciones de fabricante para aquellos equipos que por razones especiales¹³ no estén calibrados
- ⇒ Reporte de resultados de una prueba tomado aleatoriamente revisando la congruencia de estos resultados ya que se tomaran para validar el procedimiento desarrollado

3.3 Análisis del tipo de medición y modelo matemático de la eficiencia.

Es esta etapa se determino que tipo de medición se realizo partiendo del siguiente fundamento:

Las mediciones pueden ser consideradas de dos tipos: Directas e Indirectas.

Mediciones directas.

Es cuando la variable a la cual busco determinarle su valor es medida directamente ej. Para medir la temperatura de un cierto líquido utilizo un termómetro para obtener de manera inmediata este mensurando.

Mediciones Indirectas.

Es cuando la variable a la cual se busca determinar su valor (llamada dependiente) es obtenida a través de un modelo matemático que la relaciona con otras variables (llamadas independientes) las cuales son medidas directamente, ej. Para determinar la resistencia de ruptura a la tensión de una probeta de acero se requiere conocer la fuerza aplicada y el área de aplicación y se relacionan de la siguiente manera:

$$f' = \frac{F}{A}$$

Para este caso la variable objetivo es la eficiencia la cual no es determinada directamente sino que depende de otras variables: la potencia de entrada al motor y la potencia de salida corregida relacionadas por el siguiente modelo matemático:

$$\eta = \frac{P_{sc}}{P_e} \quad [1]$$

En donde:

- η Es la eficiencia del motor
- P_{sc} Es la potencia de salida corregida
- P_e Es la potencia de entrada

Por estas razones se determina que el tipo de medición para la obtención de la eficiencia energética es Indirecta por lo tanto:

¹³ Estas razones pueden ser: no hay patrones nacionales para calibrarlos, o no es obligatorio calibrarlos

Para obtener los coeficientes de sensibilidad se requiere de las derivadas parciales de este modelo matemático de acuerdo con la relación funcional:

$$\eta = f(P_{sc}, P_e) \quad [2]$$

Tenemos dos variables independientes de donde:

$$\frac{\partial \eta}{\partial P_{sc}} = \frac{1}{P_e} \quad [3]$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial P_e} = -\frac{P_{sc}}{P_e^2} \quad [4]$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres (ver capítulo III Marco teórico) para obtener la incertidumbre combinada para (η) tenemos:

$$U_{c\eta} = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{sc}}\right)^2 U_{P_{sc}}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_e}\right)^2 U_{P_e}^2} \quad [5]$$

Sustituyendo (3) y (4) en (5) se obtiene:

$$U_{c\eta} = \sqrt{\left(\frac{1}{P_e}\right)^2 U_{P_{sc}}^2 + \left(\frac{P_{sc}}{P_e^2}\right)^2 U_{P_e}^2} \quad [6]$$

Donde:

P_e es dato obtenido por medición obtenido por medio de un analizador de potencia

P_{sc} se calcula por medio de la ecuación (7)

U_{P_e} se obtiene del informe de calibración del potenciómetro.

$U_{P_{sc}}$ es la incertidumbre asociada a la potencia de salida corregida y se obtiene como se describe en el paso siguiente:

3.4 Obtención de la expresión de incertidumbre combinada de cada fuente.

Para la obtención de la incertidumbre combinada de cada fuente se hizo necesario determinar incertidumbres tipo A y tipo B (ver capítulo III Marco teórico) e incertidumbres combinadas, también se presentaron mediciones de tipo directo e indirecto.

Cuando los valores se obtienen por regresión lineal, como es el caso de la obtención de las pérdidas por fricción y ventilación P_{fv} , la aportación de incertidumbre es de tipo A y se consigue utilizando las expresiones descritas en el apartado 4.3.

3.4.1 Obtención de la incertidumbre asociada a P_{sc} .

De acuerdo con un balance de energía, la potencia de salida corregida P_{sc} puede expresarse mediante:

$$P_{sc} = P_e - P_h - P_{fv} - P_{ind} - I^2 R_{mc} - I^2 R_{rc} \quad [7]$$

Donde:

- P_e es la potencia de entrada para cada valor de carga medida
- P_h Pérdidas en el núcleo, en kW
- P_{fv} Pérdidas por fricción y ventilación, en kW
- P_{ind} Pérdidas indeterminadas, en kW
- $I^2 R_{mc}$ Pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator para cada punto de carga, en kW
- $I^2 R_{rc}$ Pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor para cada punto de carga, en kW

A partir de la derivación de la ec.(7) se obtienen los coeficientes de sensibilidad (que resultan unitarios) y aplicando la ley de propagación de incertidumbres se obtiene que la incertidumbre combinada asociada a P_{sc} es:

$$U_{C P_{sc}} = \sqrt{U_{P_e}^2 + U_{P_h}^2 + U_{P_{fv}}^2 + U_{P_{ind}}^2 + U_{I^2 R_{mc}}^2 + U_{I^2 R_{rc}}^2} \quad [8]$$

Donde:

- U_{P_e} es la incertidumbre asociada a la potencia de entrada y se obtiene del informe de calibración del potenciómetro.
- U_{P_h} Es la incertidumbre asociada a las pérdidas en el núcleo y se debe estimar.
- $U_{P_{fv}}$ Es la incertidumbre asociada a las pérdidas por fricción y ventilación y se debe estimar.
- $U_{P_{ind}}$ Es la incertidumbre asociada a las pérdidas indeterminadas y se debe estimar
- $U_{I^2 R_{mc}}$ Es la incertidumbre asociada a pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator para cada punto de carga y se debe estimar.
- $U_{I^2 R_{rc}}$ Es la incertidumbre asociada a pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor para cada punto de carga y se debe estimar.

3.4.2 Obtención de la incertidumbre asociada a las pérdidas en el núcleo.

Para obtener la incertidumbre asociada a P_h se tiene el siguiente Modelo de relación de variables aplicable:

$$P_h = P_o - P_{fv} - I^2 R_{eo} \quad [9]$$

Donde:

- P_o Potencia de entrada con el motor operando en vacío, en kW
- P_{fv} Pérdidas por fricción y ventilación, en kW
- $I^2 R_{eo}$ Pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator para la operación en vacío del motor, en kW

A partir de la derivación de la ec. [9] se obtienen los coeficientes de sensibilidad considerando la relación funcional:

$$P_h = f(P_o, P_{fv}, I^2 R_{eo})$$

Los coeficientes de sensibilidad resultan unitarios y aplicando la ley de propagación de incertidumbres se obtiene que la incertidumbre combinada asociada a P_h es:

$$U_{ph} = \sqrt{U_{P_o}^2 + U_{P_{fv}}^2 + U_{I^2 R_{eo}}^2} \quad [10]$$

Donde:

- U_{P_o} es la incertidumbre asociada a la potencia de entrada con el motor operando en vacío y se obtiene del informe de calibración del potenciómetro.
- $U_{P_{fv}}$ Es la incertidumbre asociada a las pérdidas por fricción y ventilación y se debe estimar
- $U_{I^2 R_{eo}}$ Es la incertidumbre asociada a las pérdidas por efecto joule para operación en vacío del motor y se debe estimar.

3.4.3 Obtención de la incertidumbre asociada a las pérdidas por fricción y ventilación

Para obtener la incertidumbre asociada a P_{fv} se parte del siguiente modelo de relación de variables (11) aplicable que es la ecuación de la recta ajustada por mínimos cuadrados que representa a la curva real. Con este modelo se obtiene primero el valor de P_{fv} que es el valor de la ordenada al origen de la recta y posteriormente se estima la incertidumbre asociada. (ver datos de prueba en tabla 1):

$$Y = AX + B \quad [11]$$

Donde:

- X Valor de Voltaje al Cuadrado
- Y valor de la potencia en vacío
- A es la pendiente de la recta que representa esta ecuación.
- B Es la ordenada al origen que equivale a P_v .

El método de evaluación de este parámetro es estadístico o tipo A por lo tanto:

$$U_{P_n} = S \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad [12]$$

Donde:

- x_i Son los i valores del voltaje al cuadrado (ver datos de prueba en tabla 1).
- n es el número de pares de datos considerados para la regresión.
- S Es la varianza de la recta y se debe estimar de acuerdo a la siguiente expresión:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - B - Ax_i)^2}{n - 2}} \quad [13]$$

3.4.4 Obtención de la incertidumbre asociada a las pérdidas por efecto joule de los devanados del estator.

Para la obtención de la incertidumbre asociada a este parámetro se parte del siguiente modelo de relación de variables:

$$I^2 R_{E0} = 0,0015 I_0^2 R_{E0} \quad [14]$$

Donde:

- I_0 Promedio de las corrientes de línea con el motor operando en vacío, en Amperes.
- R_{E0} Resistencia del estator medida entre las terminales de referencia, a la temperatura de la prueba de operación en vacío en Ω .

A partir de la derivación de la ec. [14] se obtienen los coeficientes de sensibilidad considerando la relación funcional:

$$I^2 R_{E0} = f(I_0, R_{E0})$$

Los coeficientes de sensibilidad resultan:

$$\frac{\partial I^2 R_{E0}}{\partial I_0} = 0,003 I_0 R_{E0} \quad [15]$$

$$\frac{\partial I^2 R_{E0}}{\partial R_{E0}} = 0,0015 I_0^2 \quad [16]$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres para obtener la incertidumbre combinada de $I^2 R_{E0}$:

$$U_{I^2 R_{E0}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I^2 R_{E0}}{\partial I_0}\right)^2 U_{I_0}^2 + \left(\frac{\partial I^2 R_{E0}}{\partial R_{E0}}\right)^2 U_{R_{E0}}^2} \quad [17]$$

Donde:

U_{I_0} Es la incertidumbre asociada al promedio de las corrientes de línea con el motor operando en vacío, en A y se obtiene del informe de calibración del analizador de potencia.

$U_{R_{E0}}$ Es la incertidumbre asociada a la resistencia del estator medida entre las terminales de referencia, a la temperatura de la prueba de operación en vacío y se debe estimar.

3.4.5 Obtención de la incertidumbre asociada a la resistencia del estator medida entre las terminales de referencia, a la temperatura de la prueba de operación en vacío

Para obtener la incertidumbre asociada a R_{E0} se tiene el siguiente modelo de relación de variables aplicable:

$$R_{E0} = R_i \frac{t_0 + K}{t_i + K} \quad [18]$$

Donde:

- R_i Resistencia de referencia medida inicialmente con el motor en frío, en ohms
- t_0 Promedio de las temperaturas de los devanados del estator para cada uno de los valores de tensión con el motor operando en vacío, en °C
- t_i Promedio de las temperaturas de los devanados del estator con el motor en frío, en °C

A partir de la derivación de la ec. [18] se obtienen los coeficientes de sensibilidad considerando la relación funcional:

$$R_{E0} = f(R_i, t_0, t_i)$$

Los coeficientes de sensibilidad resultan:

$$\frac{\partial R_{E0}}{\partial R_i} = \frac{t_0 + K}{t_i + K} \quad [19]$$

$$\frac{\partial R_{E0}}{\partial t_0} = R_i \left(\frac{1}{t_i + K} \right) \quad [20]$$

$$\frac{\partial R_{E0}}{\partial t_i} = -R_i \frac{(t_0 + K)}{(t_i + K)^2} \quad [21]$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres para obtener la incertidumbre combinada para R_{E0} y sustituyendo las ec. 19, 20 y 21 se obtiene:

$$U_{CR_{E0}} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{E0}}{\partial R_i} \right)^2 U_{R_i}^2 + \left(\frac{\partial R_{E0}}{\partial t_0} \right)^2 U_{t_0}^2 + \left(\frac{\partial R_{E0}}{\partial t_i} \right)^2 U_{t_i}^2} \quad [22]$$

Donde:

- U_{R_i} Es la incertidumbre asociada a la resistencia de referencia y se obtiene del informe de calibración del microóhmmetro
- t_0 Es la incertidumbre asociada al promedio de las temperaturas de los devanados del estator y se obtiene del informe de calibración del termómetro.
- t_i Es la incertidumbre asociada al promedio de las temperaturas de los devanados del estator y se obtiene del informe de calibración del termómetro:

3.4.6 Obtención de la incertidumbre asociada a las pérdidas indeterminadas

Para obtener la incertidumbre asociada a P_{ind} se utilizan las ec. [11], [12] y [13] del punto 4.3 ya que se tienen pares de datos que describen la curva, la cual es ajustada por regresión lineal.

$$Y = AX + B \quad [11] \text{ (repetida)}$$

Donde, para este caso:

- X Valor de Torque corregido al cuadrado
- Y valor de la potencia residual

- A* es la pendiente de la recta que representa esta ecuación.
B Es la ordenada al origen que para este caso es igual a cero

3.4.7 Obtención de la incertidumbre asociada a las pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor.

Para obtener la incertidumbre de este parámetro se parte del modelo de relación de variables siguiente:

$$I^2 R_{rc} = (P_e - I^2 R_{mc} - P_h) S_{mc} \quad [23]$$

Donde:

- P_e Potencia de entrada para cada valor de carga,
 $I^2 R_{mc}$ Pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator
 P_h Pérdidas en el núcleo,
 S_{mc} Deslizamiento por unidad de la frecuencia de rotación síncrona, para cada punto de carga medido, referido a una temperatura ambiente de 25°C

A partir de la derivación de la ec. [23] se obtienen los coeficientes de sensibilidad considerando la relación funcional:

$$R_{rc} = f(P_e, R_{mc}, R_{rc}, S_{mc})$$

Los coeficientes de sensibilidad resultan:

$$\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial P_e} = S_{mc} \quad [24]$$

$$\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial I^2 R_{mc}} = -S_{mc} \quad [25]$$

$$\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial P_h} = -S_{mc} \quad [26]$$

$$\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial S_{mc}} = (P_e - I^2 R_{mc} - P_h) \quad [27]$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres para obtener la incertidumbre combinada para $I^2 R_{rc}$ y sustituyendo las ec. [24], [25] [26] y [27] se obtiene:

$$U_{d^2R_{rc}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial P_e}\right)^2 U_{P_e}^2 + \left(\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial I^2 R_{mc}}\right)^2 U_{I^2 R_{mc}}^2 + \left(\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial P_h}\right)^2 U_{P_h}^2 + \left(\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial S_{mc}}\right)^2 U_{S_{mc}}^2} \quad [28]$$

Donde:

- U_{P_e} Es la incertidumbre asociada a la potencia de entrada para cada valor de carga y se obtiene del informe de calibración del analizador de potencia.
- $U_{I^2 R_{mc}}$ Es la incertidumbre asociada a las pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator y se debe estimar.
- U_{P_h} Es la incertidumbre asociada a las pérdidas en el núcleo y se debe estimar.
- S_{mc} Es la incertidumbre asociada al deslizamiento por unidad de la frecuencia de rotación síncrona, y se debe estimar.

3.4.8 Obtención de la incertidumbre asociada a las pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator.

Se parte del siguiente modelo de relación de variables:

$$I^2 R_{mc} = 0,0015 I_m^2 * R_{mc} \quad [29]$$

Donde:

- I_m Promedio de las corrientes de línea para cada punto de carga, en A
- R_{mc} Resistencia del estator corregida a la temperatura de los devanados para cada punto de carga, referida a una temperatura ambiente de 25°C

A partir de la derivación de la ec. [29] se obtienen los coeficientes de sensibilidad considerando la relación funcional:

$$I^2 R_{mc} = f(I_m, R_{mc})$$

Los coeficientes de sensibilidad resultan:

$$\frac{\partial I^2 R_{mc}}{\partial I_m} = 0,003 I_m R_{mc} \quad [30]$$

$$\frac{\partial I^2 R_{mc}}{\partial R_{mc}} = 0,0015 I_m^2 \quad [31]$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres para obtener la incertidumbre combinada y sustituyendo las ec. [30] y [31] se obtiene:

$$U_{\partial^2 R_{mc}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I^2 R_{mc}}{\partial I_m}\right)^2 U_{I_m}^2 + \left(\frac{\partial I^2 R_{mc}}{\partial R_{mc}}\right)^2 U_{R_{mc}}^2} \quad [32]$$

Donde:

- U_{I_m} Es la incertidumbre asociada al promedio de las corrientes de línea para cada punto de carga y se obtiene del informe de calibración del analizador de potencia
- $U_{R_{mc}}$ Es la incertidumbre asociada a la resistencia del estator corregida a la temperatura de los devanados para cada punto de carga y se debe estimar.

3.4.9 Obtención de la incertidumbre asociada a la resistencia del estator corregida a la temperatura de los devanados para cada punto de carga.

Para obtener esta incertidumbre se parte del modelo de relación de variables siguiente:

$$R_{mc} = R_f \frac{t_c + K}{t_f + K} \quad [33]$$

Donde:

- R_f Resistencia del estator medida entre las terminales de referencia después de la estabilización térmica del motor al 100% de su carga nominal, en ohms
- t_c Temperatura t_r referida a una temperatura ambiente de 25°C, en °C
- t_f Promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator después de la estabilización térmica a la cual se midió la resistencia R_f en las terminales de referencia, en °C

A partir de la derivación de la ec. [33] se obtienen los coeficientes de sensibilidad considerando la relación funcional:

$$R_{mc} = f(R_f, t_c, t_f)$$

Los coeficientes de sensibilidad resultan.

$$\frac{\partial R_{mc}}{\partial R_f} = \frac{t_c + K}{t_f + K} \quad [34]$$

$$\frac{\partial R_{mc}}{\partial t_f} = -\frac{R_f (t_c + K)}{(t_f + K)^2} \quad [35]$$

$$\frac{\partial R_{mc}}{\partial t_c} = \frac{R_f}{t_f + K} \quad [36]$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres para obtener la incertidumbre combinada y sustituyendo las ec. [34] y [35] y [36] se obtiene:

$$U_{R_{mc}} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{mc}}{\partial R_f}\right)^2 U_{R_f}^2 + \left(\frac{\partial R_{mc}}{\partial t_c}\right)^2 U_{t_c}^2 + \left(\frac{\partial R_{mc}}{\partial t_f}\right)^2 U_{t_f}^2} \quad [37]$$

Donde:

- U_{R_f} Es la incertidumbre asociada a la resistencia del estator y se obtiene del informe de calibración del micro ohmetro
- U_{t_c} Es la incertidumbre asociada a la temperatura t_c referida a una temperatura ambiente de 25°C, en °C y se obtiene del informe de calibración del termómetro
- U_{t_f} Es la incertidumbre asociada al promedio de las temperaturas detectadas en los devanados del estator y se obtiene del informe de calibración del termómetro

3.4.10 Obtención de la incertidumbre asociada al deslizamiento en por unidad de la frecuencia de rotación síncrona.

Para obtener la incertidumbre asociada a S_{mc} se parte del siguiente modelo de relación de variables.

$$S_{mc} = S_m \frac{t_c + K}{t_m + K} \quad [38]$$

Donde:

- S_m Es el deslizamiento en por unidad de la frecuencia de rotación síncrona, para cada punto de carga medido
- t_c Es la temperatura t_c referida a una temperatura ambiente de 25°C, en °C
- t_m Promedio de las temperaturas de los devanados del estator para cada punto de carga, en °C
- K Es la constante del material de los devanados del estator

A partir de la derivación de la ec. [38] se obtienen los coeficientes de sensibilidad considerando la relación funcional:

$$S_{mc} = (S_m, t_c, t_m)$$

Los coeficientes de sensibilidad resultan:

$$\frac{\partial S_{mc}}{\partial S_m} = \frac{t_c + K}{t_m + K} \quad [39]$$

$$\frac{\partial S_{mc}}{\partial t_c} = \frac{S_m}{t_m + K} \quad [40]$$

$$\frac{\partial S_{mc}}{\partial t_m} = -\frac{S_m(t_c + K)}{(t_m + K)^2} \quad [41]$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres para obtener la incertidumbre combinada y sustituyendo las ec. [39], [40] y [41] se obtiene:

$$U_{cS_{mc}} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_{mc}}{\partial S_m}\right)^2 U_{S_m}^2 + \left(\frac{\partial S_{mc}}{\partial t_c}\right)^2 U_{t_c}^2 + \left(\frac{\partial S_{mc}}{\partial t_m}\right)^2 (U_{t_m}^2)^2} \quad [42]$$

Donde:

U_{S_m} Es la incertidumbre asociada al deslizamiento en por unidad de la frecuencia de rotación síncrona y se debe estimar.

U_{t_c} Es la incertidumbre asociada a la temperatura t_c referida a una temperatura ambiente de 25°C, en °C y se obtiene del informe de calibración del termómetro.

U_{t_m} Es la incertidumbre asociada al promedio de las temperaturas de los devanados del estator y se obtiene del informe de calibración del termómetro.

3.4.11 Obtención de la incertidumbre asociada al deslizamiento por unidad de la frecuencia de rotación síncrona.

Para obtener la incertidumbre asociada a S_m se parte de la siguiente expresión de relación de variables:

$$S_m = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad [43]$$

Donde:

n_s es la frecuencia de rotación síncrona, en min^{-1}
 n_m es la frecuencia de rotación para cada valor de carga medida

A partir de la derivación de la ec. [43] se obtienen los coeficientes de sensibilidad considerando la relación funcional:

$$S_m = f(n_s, n_m)$$

Los coeficientes de sensibilidad resultan

$$\frac{\partial S_m}{\partial n_s} = \frac{n_m}{n_s^2} \quad [44]$$

$$\frac{\partial S_m}{\partial n_m} = -\frac{1}{n_s} \quad [45]$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres para obtener la incertidumbre combinada y sustituyendo las ec. [44] y [45] se obtiene:

$$U_{cS_m} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_m}{\partial n_s}\right)^2 (U_{n_s}^2) + \left(\frac{\partial S_m}{\partial n_m}\right)^2 (U_{n_m}^2)} \quad [46]$$

Donde:

- U_{n_m} Es la incertidumbre asociada a la frecuencia de rotación sincronía obtenida considerando la resolución del instrumento con el que se realizó la medición:
- U_{n_s} Es la incertidumbre asociada a la frecuencia de rotación para cada valor de carga medida y se debe estimar.

3.4.12 Obtención de la incertidumbre asociada a la frecuencia de rotación síncrona.

Para obtener este parámetro se cuenta con el siguiente modelo de relación de variables:

$$n_s = \frac{120F}{2P} \quad [47]$$

Donde:

- F es la frecuencia en m^{-1}
- $2P = 4$

A partir de la derivación de la ec. [47] se obtiene el coeficiente de sensibilidad considerando la relación funcional:

$$n_s = f(F)$$

El coeficiente de sensibilidad obtenido es:

$$\frac{\partial n_s}{\partial F} = \frac{120}{2P} \dots\dots [48]$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres para obtener la incertidumbre combinada y sustituyendo la ec. [48] se obtiene:

$$U_{c\eta} = \sqrt{\left(\frac{\partial n_s}{\partial F}\right)^2 U_F^2} \quad [49]$$

Donde:

U_F es la incertidumbre que se obtiene del informe de calibración del analizador de potencia.

3.5 Obtención de la expresión de la incertidumbre expandida.

Una vez estimadas las fuentes de incertidumbre que van a contribuir al valor de la incertidumbre combinada, a esta incertidumbre se le asocia un intervalo de probabilidad o nivel de confianza y considerando que por convención generalmente es de 95,45% con factor multiplicativo de cobertura de $K=2$ de la siguiente forma.

$$U = U_{c\eta} * k \quad [50]$$

Donde:

$U_{c\eta}$ Es la incertidumbre combinada de la eficiencia obtenida en la etapa 3 ec. [5]

k Es el factor de cobertura generalmente $k=2$

El resultado obtenido por esta expresión es la incertidumbre expandida y es la que se asocia al resultado obtenido de eficiencia.

Como resultado del desarrollo de las etapas anteriores se cuenta con los elementos suficientes para desarrollar un procedimiento que va a describir de manera ordenada los pasos a seguir para la obtención de la incertidumbre que se va a asociar a la eficiencia obtenida en cada una de las pruebas que se realicen y pueda ser utilizado de manera eficaz por el personal del laboratorio.

El procedimiento propuesto es el que a continuación se presenta en el cual se podrá observar que el orden de la fórmulas obtenidas es en forma inversa a como se fue desarrollando la metodología.

Es importante resaltar que en procedimiento se omite la descripción de las variables que se manejan ya que el personal que en su momento lo aplique está capacitado, familiarizado con todas y cada una de ellas y tiene la competencia para realizar las pruebas que establece la Norma NOM-016-ENER-2002 [3]

3.6 Procedimiento para estimar la incertidumbre asociada a la eficiencia energética en motores de corriente alterna trifásicos.

Objetivo.

Establecer los pasos a seguir para la estimación de la incertidumbre asociada a la eficiencia energética obtenida en los motores de corriente alterna trifásicos tipo jaula de ardilla.

Responsabilidades.

Es responsabilidad del personal técnico que realice a prueba para la obtención de la eficiencia, estimar la incertidumbre de medición correspondiente.

Es responsabilidad del jefe del laboratorio supervisar el desarrollo de la prueba y revisar los cálculos de incertidumbre.

Alcance.

El presente procedimiento aplica sobre los resultados de eficiencia obtenidos en pruebas a motores de inducción trifásicos tipo jaula de ardilla.

Términos y definiciones

Consultar los descritos en el anexo 4 de esta tesis

Actividades.

Los pasos a seguir para la obtención de la eficiencia son los siguientes:

- 1.- Obtener la incertidumbre asociada a la frecuencia de rotación sincronía (n_s).
 - 1.1 Obtener los valores del coeficiente de sensibilidad.

$$\frac{\partial n_s}{\partial F} = \frac{120}{2P} \quad [51]$$

- 1.2 Estimar la incertidumbre combinada:

$$U_{cn_r} = \sqrt{\left(\frac{\partial n_s}{\partial F}\right)^2 U_F^2} \quad [52]$$

2. Obtener la incertidumbre asociada al deslizamiento en por unidad de la frecuencia de rotación síncrona, para cada punto de carga medido S_m a partir de la siguiente expresión:

$$S_m = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad [53]$$

2.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\begin{aligned}\frac{\partial S_m}{\partial n_s} &= \frac{n_m}{n_s^2} \\ \frac{\partial S_m}{\partial n_m} &= -\frac{1}{n_s}\end{aligned} \quad [54], [55]$$

2.2 Estimar la incertidumbre combinada para S_m :

$$U_{cS_m} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_m}{\partial n_s}\right)^2 (U_{n_s}^2) + \left(\frac{\partial S_m}{\partial n_m}\right)^2 (U_{n_m}^2)} \quad [56]$$

3. Obtener la incertidumbre asociada a S_{mc} a partir de la siguiente expresión

$$S_{mc} = Sm \frac{t_c + K}{t_m + K} \quad [57]$$

3.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\begin{aligned}\frac{\partial S_{mc}}{\partial S_m} &= \frac{t_c + K}{t_m + K} \\ \frac{\partial S_{mc}}{\partial t_c} &= \frac{Sm}{t_m + K} \\ \frac{\partial S_{mc}}{\partial t_m} &= -\frac{S_m(t_c + K)}{(t_m + K)^2}\end{aligned} \quad [58], [59], [60]$$

3.2 Estimar la incertidumbre combinada para S_{mc}

$$U_{cS_{mc}} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_{mc}}{\partial S_m}\right)^2 U_{S_m}^2 + \left(\frac{\partial S_{mc}}{\partial t_c}\right)^2 U_{t_c}^2 + \left(\frac{\partial S_{mc}}{\partial t_m}\right)^2 (U_{t_m}^2)^2} \quad [61]$$

4. Obtener la incertidumbre asociada a R_{mc} partiendo de la siguiente expresión:

$$R_{mc} = R_f \frac{t_c + K}{t_f + K} \quad [62]$$

4.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial R_{mc}}{\partial R_f} = \frac{t_c + K}{t_f + K}$$

$$\frac{\partial R_{mc}}{\partial t_f} = -\frac{R_f(t_c + K)}{(t_f + K)^2} \quad [63], [64], [65]$$

$$\frac{\partial R_{mc}}{\partial t_c} = \frac{R_f}{t_f + K}$$

4.2 Estimar la incertidumbre combinada:

$$U_{cR_{mc}} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{mc}}{\partial R_f}\right)^2 U_{Rf}^2 + \left(\frac{\partial R_{mc}}{\partial t_c}\right)^2 U_{t_c}^2 + \left(\frac{\partial R_{mc}}{\partial t_f}\right)^2 U_{t_f}^2} \quad [66]$$

5. Calcular la incertidumbre asociada a las perdidas por efecto joule en el estator corregidas por temperatura. ($I^2 R_{mc}$) partiendo de la siguiente expresión:

$$I^2 R_{mc} = 0,0015 I_m^2 R_{mc} \quad [67]$$

5.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial I^2 R_{mc}}{\partial I_m} = 0,003 I_m R_{mc}$$

[68], [69]

$$\frac{\partial I^2 R_{mc}}{\partial R_{mc}} = 0,0015 I_m^2$$

5.2 Estimar la incertidumbre combinada para $I^2 R_{mc}$:

$$U_{cI^2 R_{mc}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I^2 R_{mc}}{\partial I_m}\right)^2 U_{I_m}^2 + \left(\frac{\partial I^2 R_{mc}}{\partial R_{mc}}\right)^2 U_{R_{mc}}^2} \quad [70]$$

6. Calcular la incertidumbre para la resistencia entre las terminales de referencia partiendo de la siguiente expresión:

$$R_{E0} = R_i \frac{t_0 + K}{t_i + K} \quad [71]$$

6.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial R_{E0}}{\partial R_i} = \frac{t_0 + K}{t_i + K}$$

$$\frac{\partial R_{E0}}{\partial t_0} = R_i \left(\frac{1}{t_i + K} \right) \quad [72], [73], [74]$$

$$\frac{\partial R_{E0}}{\partial t_i} = -R_i \frac{(t_0 + K)}{(t_i + K)^2}$$

6.2 Estimar la incertidumbre combinada para R_{E0} :

$$U_{CR_{E0}} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{E0}}{\partial R_i} \right)^2 U_{R_i}^2 + \left(\frac{\partial R_{E0}}{\partial t_0} \right)^2 U_{t_0}^2 + \left(\frac{\partial R_{E0}}{\partial t_i} \right)^2 U_{t_i}^2} \quad [75]$$

7. Obtener la incertidumbre asociada a las pérdidas de los devanados del estator.

$$I^2 R_{E0} = 0,0015 I_0^2 R_{E0} \quad [76]$$

7.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial I^2 R_{E0}}{\partial I_0} = 0,003 I_0 R_{E0}$$

[77], [78]

$$\frac{\partial I^2 R_{E0}}{\partial R_{E0}} = 0,0015 I_0^2$$

7.2 Estimar la incertidumbre combinada de $I^2 R_{E0}$:

$$U_{cl^2 R_{\epsilon 0}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I^2 R_{E0}}{\partial I_0}\right)^2 U_{I_0}^2 + \left(\frac{\partial I^2 R_{E0}}{\partial R_{E0}}\right)^2 U_{R_{\epsilon 0}}^2} \quad [79]$$

8.- Obtener la incertidumbre asociada a las pérdidas por fricción y ventilación P_{fv} de la siguiente manera:

$$U_{P_{fv}} = S \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad [80]$$

8.1 Calcular la desviación estándar mediante:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - b - Ax)^2}{n - 2}} \quad [81]$$

9.- Obtener la incertidumbre asociada a las pérdidas en el núcleo P_h mediante:

$$U_{P_h} = \sqrt{U_{P_0}^2 + U_{P_{fv}}^2 + U_{I^2 R_{\epsilon 0}}^2} \quad [82]$$

10.- Obtener la incertidumbre asociada a las pérdidas indeterminadas P_{ind} partiendo de la siguiente expresión:

$$P_{ind} = AT_c^2 \quad [83]$$

10.1 Calcular la incertidumbre para la recta ajustada por regresión:

$$U_{P_{ind}} = S \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad [84]$$

10.2 Obtener la desviación estándar con la siguiente expresión:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - b - Ax)^2}{n - 2}} \quad [85]$$

11.- Obtener la incertidumbre asociada a las pérdidas por efecto joule en el devanado del rotor $I^2 R_{rc}$ partiendo de la siguiente expresión:

$$I^2 R_{rc} = (P_e - I^2 R_{mc} - P_h) S_{mc} \quad [86]$$

11.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial P_e} &= S_{mc} \\ \frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial I^2 R_{mc}} &= -S_{mc} \\ \frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial P_h} &= -S_{mc} \\ \frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial S_{mc}} &= (P_e - I^2 R_{mc} - P_h) \end{aligned} \quad [87], [88], [89], [90]$$

11.2 Estimar la incertidumbre combinada para $I^2 R_{rc}$:

$$U_{cI^2 R_{rc}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial P_e}\right)^2 U_{P_e}^2 + \left(\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial I^2 R_{mc}}\right)^2 U_{I^2 R_{mc}}^2 + \left(\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial P_h}\right)^2 U_{P_h}^2 + \left(\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial S_{mc}}\right)^2 U_{S_{mc}}^2} \quad [91]$$

12.- Obtener la incertidumbre asociada a la presión de salida corregida P_{sc} de la siguiente manera:

$$U_{cP_{sc}} = \sqrt{U_{P_e}^2 + U_{P_h}^2 + U_{P_{fs}}^2 + U_{P_{ind}}^2 + U_{I^2 R_{mc}}^2 + U_{I^2 R_{rc}}^2} \quad [92]$$

13.- Obtener la incertidumbre asociada a la eficiencia η partiendo del modelo matemático:

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} * 100 \quad [93]$$

13.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial \eta}{\partial P_s} = \frac{100}{P_e} \quad [94], [95]$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial P_e} = -\frac{P_s * 100}{P_e^2}$$

13.2 Estimar la incertidumbre combinada para la eficiencia (η):

$$U_{c\eta} = \sqrt{\left(\frac{\partial\eta}{\partial P_s}\right)^2 U_{P_{sc}}^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial P_e}\right)^2 U_{P_e}^2} \quad [96]$$

14. Obtener la incertidumbre expandida de la eficiencia (η) asociándole un nivel de confianza.

$$U_{\eta} = U_{c\eta} * k \quad [97]$$

Donde:

k = es el factor de cobertura que asocia un 95,45% de confianza ($K=2$)

3.7 Validación del procedimiento

Para poder verificar que el procedimiento establecido genera resultados congruentes se tomaron datos y resultados de una prueba realizada para obtener la eficiencia energética de un motor de corriente alterna de inducción trifásico, además de los datos de incertidumbre obtenidos de los informes de calibración de algunos de los equipos e instrumentos.

Datos de prueba.

$P_e = 19,975$ (kW)	$P_s = 18,540$ (kW)	$P_o = 0,574$ (kW)	$P_h = 0,310$ (kW)
$P_{fv} = 0,183$ (kW)	$P_{ind} = 0,160$ 3 (kW)	$I^2R_{mc} = 0,513$ 5(kW)	$I^2R_{rc} = 0,266$ 8(kW)
$I^2R_{EO} = 0,080$ (kW)	$I_o = 13,25$ (A)	$t_o = 49,50$ C	$t_i = 16,0$ C
$R_i = 0,2706$ Ohm	$T_c = 100,07$ Nm	$A = 0,016$ 0	$n_{min} = 1$ 800
$n_o = 1$ 800	$K = 234,5$	$2P$ (No. polos) = 4	$I_m = 30,54$ (A)
$R_{mc} = 0,367$ 0 Ohm	$t_r = 76$ C	$R_r = 0,362$ 4 Ohm	$S_{mc} = 0,013$ 9
$T_m = 99,601$ C	$S_m = 0,0138$	$n_m = 1$ 775 (min^{-1})	$n_s = 1$ 800

U analizador de potencia = 2,88765E-5 U termómetro = 0,340°C
 U micro-ohmetro = 0,016Ω U torquímetro = 0,000 47 Nm U tacómetro = 0,167

Tabla 1 Datos correspondientes a curva de vacío para determinación de P_{fv} y P_h

Punto número:	Valor de Voltaje al Cuadrado (Abscisa) [V ²]	Valor de Potencia en vacío [kW]
1	52 854,01	0,246
2	40 000,00	0,231
3	28 900,00	0,223
4	19 656,04	0,201
5	12 100,00	0,196
6	6 400,00	0,193
7	3 624,04	0,185

$Y = AX + B$ (Ecuación de la recta)

Pendiente $A = 1,23096E-6$ $B = P_{fv} = 0,183$ Correlación: 0,9885751

Tabla 2 Datos correspondientes a prueba de funcionamiento para determinación de P_{ind}

Punto número	Torque corregido al cuadrado [Nm]	Potencia Residual P_{res} [kW]
1	22 807,040 0	0,372
2	15 590, 019 6	0,268
3	10 014, 004 9	0,138
4	5 543,993 764	0,098
5	2 430,884 416	0,056
6	601, 181 361	0,013

Y = AX + B (Ecuación de la recta)

Pendiente A = 1,602281E-5 B = Intersección = 0,005 769 4 Correlación: 0.9942

Los datos anteriores se utilizaron en la metodología desarrollada de la siguiente manera:

1.- Obtener la incertidumbre asociada a n_s a partir de la siguiente expresión:

$$n_s = \frac{120F}{2P}$$

1.1 Obtener los valores del coeficiente de sensibilidad.

$$\frac{\partial n_s}{\partial F} = \frac{120}{2P} \Rightarrow \frac{120}{4} = 30$$

1.2 Estimar la incertidumbre combinada:

$$U_{cn_s} = \sqrt{\left(\frac{\partial n_s}{\partial F}\right)^2 U_F^2} \Rightarrow \sqrt{(30)^2 (0,288675 * 10^{-4})^2}$$

$$U_{cn_s} = 0,866 * 10^{-3} [\text{min}^{-1}]$$

2.-Obtener la incertidumbre asociada a S_m a partir de la siguiente expresión:

$$S_m = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

2.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial S_m}{\partial n_s} = \frac{n_m}{n_s^2} \Rightarrow \frac{1775}{(1800)^2} = 0,547 * 10^{-3} \left[\frac{1}{\text{min}^{-1}} \right]$$

$$\frac{\partial S_m}{\partial n_m} = -\frac{1}{n_s} \Rightarrow -\frac{1}{1800} = -0,555 * 10^{-3} \left[\frac{1}{\text{min}^{-1}} \right]$$

2.2 Estimar la incertidumbre combinada para S_m :

$$U_{\varepsilon S_m} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_m}{\partial n_s}\right)^2 (U_{n_s}^2) + \left(\frac{\partial S_m}{\partial n_m}\right)^2 (U_{n_m}^2)}$$

$$U_{\varepsilon S_m} = \sqrt{(0,547 * 10^{-3})^2 (0,866 * 10^{-3})^2 + (0,555 * 10^{-3})^2 \left(\frac{0,167}{2}\right)^2}$$

$$U_{\varepsilon S_m} = 4,6345 * 10^{-5} [\alpha \text{ dim}]$$

3.- Obtener la incertidumbre asociada a S_{mc} a partir de la siguiente expresión

$$S_{mc} = Sm \frac{t_c + K}{t_m + K}$$

3.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial S_{mc}}{\partial S_m} = \frac{t_c + K}{t_m + K} \Rightarrow \frac{80 + 234,5}{79 + 234,5} = 1,00319 [\alpha \text{ dim}]$$

$$\frac{\partial S_{mc}}{\partial t_c} = \frac{Sm}{t_m + K} \Rightarrow \frac{0,0138}{313,5} = 0,44 * 10^{-4} \left[\frac{1}{C} \right]$$

$$\frac{\partial S_{mc}}{\partial t_m} = -\frac{S_m(t_c + K)}{(t_m + K)^2} \Rightarrow \frac{0,0138(314,5)}{(313,5)^2} = -4,41596 * 10^{-5} \left[\frac{1}{C} \right]$$

3.2 Estimar la incertidumbre combinada para S_{mc}

$$U_{\varepsilon S_{mc}} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_{mc}}{\partial S_m}\right)^2 U_{S_m}^2 + \left(\frac{\partial S_{mc}}{\partial t_c}\right)^2 U_{t_c}^2 + \left(\frac{\partial S_{mc}}{\partial t_m}\right)^2 (U_{t_m}^2)^2}$$

$$U_{\varepsilon S_{mc}} = \sqrt{(1,00319)^2 (45,7 * 10^{-7})^2 + (0,44 * 10^{-4})^2 \left(\frac{0,34}{2}\right)^2 + (-4,41596 * 10^{-5})^2 \left(\frac{0,34}{2}\right)^2}$$

$$U_{\varepsilon S_{mc}} = 4,7687 * 10^{-5} [\alpha \text{ dim}]$$

4.- Obtener la incertidumbre asociada a R_{mc} partiendo de la siguiente expresión:

$$R_{mc} = R_f \frac{t_c + K}{t_f + K}$$

4.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial R_{mc}}{\partial R_f} = \frac{t_c + K}{t_f + K} \Rightarrow \frac{80 + 234,5}{76 + 234,5} = 1,0129 [\alpha \text{ dim}]$$

$$\frac{\partial R_{mc}}{\partial t_f} = -\frac{R_f(t_c + K)}{(t_f + K)^2} \Rightarrow -\frac{0,3624(314,5)}{(310,5)^2} = -1,182 * 10^{-3} \left[\frac{\Omega}{C} \right]$$

$$\frac{\partial R_{mc}}{\partial t_c} = \frac{R_f}{t_f + K} \Rightarrow \frac{0,3624}{310,5} = 1,167 * 10^{-3} \left[\frac{\Omega}{C} \right]$$

4.2 Estimar la incertidumbre combinada:

$$U_{\alpha R_{mc}} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{mc}}{\partial R_f}\right)^2 U_{R_f}^2 + \left(\frac{\partial R_{mc}}{\partial t_c}\right)^2 U_{t_c}^2 + \left(\frac{\partial R_{mc}}{\partial t_f}\right)^2 U_{t_f}^2}$$

$$U_{\alpha R_{mc}} = \sqrt{(1,0129)^2 \left(\frac{0,016}{2}\right)^2 + (-1,182 * 10^{-3})^2 \left(\frac{0,34}{2}\right)^2 + (1,167 * 10^{-3})^2 \left(\frac{0,34}{2}\right)^2}$$

$$U_{\alpha R_{mc}} = 8,108 * 10^{-3} [\Omega]$$

5.- Calcular la incertidumbre asociada a las pérdidas por efecto joule en el estator corregidas por temperatura. ($I^2 R_{mc}$) partiendo de la siguiente expresión:

$$I^2 R_{mc} = 0,0015 I_m^2 R_{mc} \text{ [kW]}$$

donde:

I_m en amperes y
 R_{mc} en ohms

5.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial I^2 R_{mc}}{\partial I_m} = 0,003 I_m R_{mc} \Rightarrow 0,003(30,54)(0,367) = 0,0336 [\Omega A]$$

$$\frac{\partial I^2 R_{mc}}{\partial R_{mc}} = 0,0015 I_m^2 \Rightarrow 0,0015(30,54)^2 = 1,399 [A^2]$$

5.2 Estimar la incertidumbre combinada para $I^2 R_{mc}$:

$$U_{I^2 R_{mc}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I^2 R_{mc}}{\partial I_m}\right)^2 U_{I_m}^2 + \left(\frac{\partial I^2 R_{mc}}{\partial R_{mc}}\right)^2 U_{R_{mc}}^2}$$

$$U_{I^2 R_{mc}} = \sqrt{(0,0336)^2 (2,88765 * 10^{-5})^2 + (1,399)^2 (8,108 * 10^{-3})^2}$$

$$U_{I^2 R_{mc}} = 1,134 * 10^{-2} [\Omega A^2]$$

debido a que el coeficiente de la fórmula está dado para que el resultado se exprese en kW:

$$U_{I^2 R_{mc}} = 1,134 * 10^{-2} [kW]$$

6.- Calcular la incertidumbre para la resistencia entre las terminales de referencia partiendo de la siguiente expresión:

$$R_{E0} = R_i \frac{t_0 + K}{t_i + K}$$

6.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial R_{E0}}{\partial R_i} = \frac{t_0 + K}{t_i + K} \Rightarrow \frac{49,5 + 234,5}{16 + 234,5} = 1,1337 [a \text{ dim}]$$

$$\frac{\partial R_{E0}}{\partial t_0} = R_i \left(\frac{1}{t_i + K} \right) \Rightarrow \frac{0,2706}{16 + 234,5} = 1,08 * 10^{-3} \left[\frac{\Omega}{C} \right]$$

$$\frac{\partial R_{E0}}{\partial t_i} = -R_i \frac{(t_0 + K)}{(t_i + K)^2} \Rightarrow -(0,2706) \frac{(49,5 + 234,5)}{(16 + 234,5)^2} = -1,22 * 10^{-3} \left[\frac{\Omega}{C} \right]$$

6.2 Estimar la incertidumbre combinada para R_{E0} :

$$U_{cR_{E0}} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{E0}}{\partial R_i}\right)^2 U_{R_i}^2 + \left(\frac{\partial R_{E0}}{\partial t_0}\right)^2 U_{t_0}^2 + \left(\frac{\partial R_{E0}}{\partial t_i}\right)^2 U_{t_i}^2}$$

$$U_{cR_{E0}} = \sqrt{(1,1337)^2 \left(\frac{0,016}{2}\right)^2 + (1,08 * 10^{-3})^2 \left(\frac{0,34}{2}\right)^2 + (-1,22 * 10^{-3})^2 \left(\frac{0,34}{2}\right)^2}$$

$$U_{cR_{E0}} = 9,074 * 10^{-3} [\Omega]$$

7.- Obtener la incertidumbre asociada a las perdidas de los devanados del estator.

$$I^2 R_{E0} = 0,0015 I_0^2 R_{E0} [\text{kW}]$$

donde:

I_m en amperes y
 R_{mec} en ohms

7.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial I^2 R_{E0}}{\partial I_0} = 0,003 I_0 R_{E0} \Rightarrow (0,003)(13,25)(0,3067) = 0,0122 [\Omega A]$$

$$\frac{\partial I^2 R_{E0}}{\partial R_{E0}} = 0,0015 I_0^2 \Rightarrow (0,0015)(13,25)^2 = 0,2633 [A^2]$$

7.2 Estimar la incertidumbre combinada de $I^2 R_{E0}$:

$$U_{cI^2 R_{E0}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I^2 R_{E0}}{\partial I_0}\right)^2 U_{I_0}^2 + \left(\frac{\partial I^2 R_{E0}}{\partial R_{E0}}\right)^2 U_{R_{E0}}^2}$$

$$U_{cI^2 R_{E0}} = \sqrt{(0,0122)^2 (2,88765 * 10^{-5})^2 + (0,2633)^2 (9,074 * 10^{-3})^2}$$

$$UcI^2R_{\infty} = 2,3887 * 10^{-3} [\Omega A^2]$$

Debido a que el coeficiente de la fórmula está dado para que el resultado se exprese en kW:

$$UcI^2R_{\infty} = 2,3887 * 10^{-3} [kW]$$

8.- Obtener la incertidumbre asociada a las perdidas por fricción y ventilación P_{fv} de la siguiente manera:

$$U_{P_{fv}} = S \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}}$$

8.1 Donde la desviación estándar se obtiene:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - b - Ax)^2}{n - 2}}$$

$$S = \sqrt{\frac{(0,246 - 0,183 - 0,06506)^2 + (0,2231 - 0,183 - 0,04924)^2 + (0,223 - 0,183 - 0,0356)^2 + \dots + (0,201 - 0,183 - 0,0242)^2 + (0,196 - 0,183 - 0,0149)^2 + (0,193 - 0,183 - 0,0079)^2 + \dots + (0,185 - 0,183 - 0,0045)^2}{7 - 2}}$$

$$S = 0,003947 [kW]$$

$$UP_{fv} = (0,003947) \sqrt{\frac{5815619947}{7(5815619947) - (26743398542)}}$$

$$UP_{fv} = 0,002547 [kW]$$

9.- Obtener la incertidumbre asociada a las perdidas en el núcleo P_h de la siguiente manera:

$$U_{P_h} = \sqrt{U_{P_0}^2 + U_{P_{fv}}^2 + U_{I^2R_{\infty}}^2}$$

$$UP_h = \sqrt{(2,88765 * 10^{-5})^2 + (0,002547)^2 + (0,00233961)^2}$$

$$UP_h = 3,46 \cdot 10^{-3} [\text{kW}]$$

10.- Obtener la incertidumbre asociada a las pérdidas indeterminadas (P_{ind}) partiendo de la siguiente expresión:

$$P_{ind} = AT_c^2$$

10.1 La incertidumbre estimada para la recta ajustada por regresión lineal es por lo tanto:

$$U_{P_{ind}} = S \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}}$$

10.2 Donde la desviación estándar se obtiene:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - b - Ax)^2}{n - 2}}$$

$$S = \sqrt{\frac{(0,372 - 0,005769 - 0,36543)^2 + (0,268 - 0,005769 - 0,24979)^2 + (0,138 - 0,005769 - 0,16045)^2 + \dots + (0,098 - 0,005769 - 0,08883)^2 + (0,056 - 0,005769 - 0,03894)^2 + (0,013 - 0,005769 - 0,00963)^2}{6 - 2}}$$

$$S = 0,0082785 [\text{kW}]$$

$$UP_{ind} = (0,0082785) \sqrt{\frac{(900496563,8)}{6(900496563,8) - (56987,12404)^2}}$$

$$UP_{ind} = 0,005351 [\text{kW}]$$

11.- Obtener la incertidumbre asociada las pérdidas por efecto joule en el devanado del rotor $I^2 R_{rc}$ partiendo de la siguiente expresión:

$$I^2 R_{rc} = (P_e - I^2 R_{mc} - P_h) S_{mc}$$

11.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial P_s} = S_{mc} \Rightarrow 0,0139 [\alpha \text{ dim}]$$

$$\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial I^2 R_{mc}} = -S_{mc} \Rightarrow -0,0139 [\alpha \text{ dim}]$$

$$\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial P_h} = -S_{mc} \Rightarrow -0,0139 [\alpha \text{ dim}]$$

$$\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial S_{mc}} = (P_s - I^2 R_{mc} - P_h) \Rightarrow 19,975 - 0,5135 - 0,31 = 19,1515 [\text{kW}]$$

11.2 Estimar la incertidumbre combinada para $I^2 R_{rc}$:

$$U_{cI^2 R_{rc}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial P_s}\right)^2 U_{P_s}^2 + \left(\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial I^2 R_{mc}}\right)^2 U_{I^2 R_{mc}}^2 + \left(\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial P_h}\right)^2 U_{P_h}^2 + \left(\frac{\partial I^2 R_{rc}}{\partial S_{mc}}\right)^2 U_{S_{mc}}^2}$$

$$U_{cI^2 R_{rc}} = \sqrt{(0,013)^2 (2,88 * 10^{-5})^2 + (-0,013)^2 (0,011)^2 + (-0,013)^2 (3,46 * 10^{-3})^2 + (19,15)^2 (4,77 * 10^{-5})^2}$$

$$U_{cI^2 R_{rc}} = 9,288 * 10^{-4} [\text{kW}]$$

12.- Obtener la incertidumbre asociada a la presión de salida corregida P_{sc} de la siguiente manera:

$$U_{cP_{sc}} = \sqrt{U_{P_s}^2 + U_{P_h}^2 + U_{P_{fv}}^2 + U_{P_{ind}}^2 + U_{I^2 R_{mc}}^2 + U_{I^2 R_{rc}}^2}$$

$$U_{cP_{sc}} = \sqrt{(2,8876 * 10^{-5})^2 + (0,00346)^2 + (0,002547)^2 + (0,00535)^2 + (1,134 * 10^{-2})^2 + (9,288 * 10^{-4})^2}$$

$$U_{cP_{sc}} = 1,2162 * 10^{-2} [\text{kW}]$$

13.- Obtener la incertidumbre asociada a la eficiencia (η) partiendo del modelo matemático:

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} * 100$$

13.1 Calcular los valores de los coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial \eta}{\partial P_s} = \frac{100}{P_s} \Rightarrow \frac{100}{19,975} = 5.006 \left[\frac{1}{\text{kW}} \right]$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial P_e} = -\frac{P_s * 100}{P_s^2} \Rightarrow \frac{(18,5414)100}{(19,975)^2} = 4,6469 \left[\frac{1}{\text{kW}} \right]$$

13.2 Estimar la incertidumbre combinada para la eficiencia (η):

$$U_{c\eta} = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial P_s}\right)^2 U_{P_s}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_e}\right)^2 U_{P_e}^2}$$

$$U_{c\eta} = \sqrt{(5,005)^2 (1,2162 * 10^{-2})^2 + (4,6469)^2 (2,88675 * 10^{-5})^2}$$

$$U_{c\eta} = 0,0609[\%]$$

14. Obtener la incertidumbre expandida de la eficiencia (η) asociándole un nivel de confianza.

$$U_{\eta} = U_{c\eta} * k$$

$$U_{\eta} = 0,0609 * 2$$

$$U_{\eta} = \pm 0,122 [\%]$$

Donde:

$K=$ es el factor de cobertura que asocia un 95,45% de confianza ($K=2$)

15.- Para fines prácticos se recomienda realizar los pasos antes descritos en una hoja de cálculo (excell o cualquier otro programa) para este caso la metodología desarrollada se aplico en excell ver anexo 5.

Capítulo IV

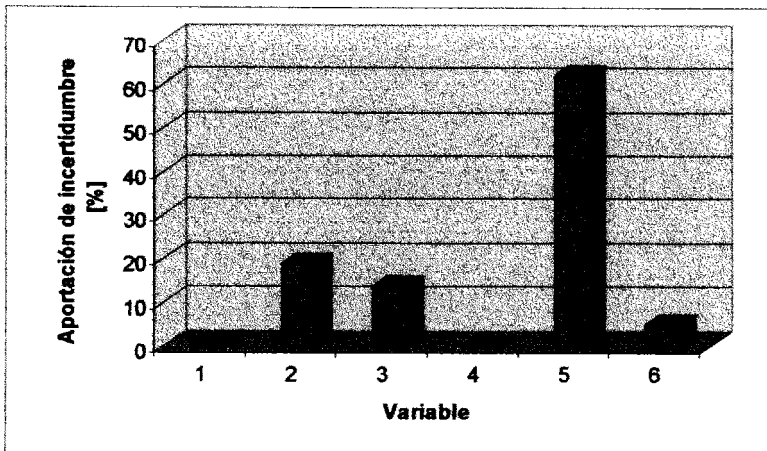
Análisis de resultados

4.1 Tabla y grafica comparativa de incertidumbre

Los valores de los valores calculados de las fuentes de incertidumbre y el porcentaje de aportación de cada una de ellas puede observarse en la tabla 2 y la gráfica 2.

Número	Variable	Incertidumbre [kW]	Aportación [%]
1	P_e	0,0002886	0,1577
2	P_h	0,00346	18,902
3	P_{IV}	0,002547	13,914
4	P_{ind}	0,00000009	0,0005
5	I^2R_{mc}	0,01134	61,951
6	I^2R_{rc}	0,0009288	5,0741

Tabla 2. incertidumbres asociadas a las variables calculadas en una prueba



Gráfica 2. porcentaje de aportación de cada fuente de incertidumbre.

4.2 Relación de la incertidumbre con la tolerancia

La utilidad de la incertidumbre estimada cobra importancia cuando se relaciona con la tolerancia que rige el resultado obtenido en la prueba, ya que puede llegar a ser determinante en la liberación o rechazo del motor ensayado.

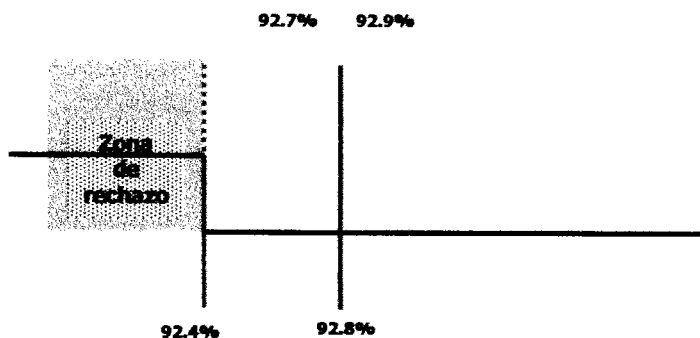
Para esta prueba el resultado con su correspondiente incertidumbre se relaciona con la tolerancia de la siguiente manera:

$$\rho = 92,83\%$$

$$U_p = 0,122\%$$

La eficiencia encontrada para una potencia de 19,975 Kw debe ser mayor o igual a 92,4 para un motor cerrado de 4 polos, ver tabla de anexo 1.

En este caso solamente tenemos una tolerancia inferior por lo tanto la zona de aceptación considerando la incertidumbre es:



Relación de la incertidumbre con la tolerancia para la prueba desarrollada

Por lo tanto, el valor encontrado se encuentra dentro de tolerancia de norma aún considerando la incertidumbre estimada.

Capítulo V

Conclusiones

De la tabla 2 y de la gráfica 2, se aprecia que las componentes de incertidumbre de importancia por su contribución en la incertidumbre asociada a la eficiencia son, de mayor a menor:

1. La incertidumbre asociada a las pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator.
2. La incertidumbre asociada a las pérdidas en el núcleo.
3. La incertidumbre asociada a las pérdidas por fricción y ventilación.
4. Incertidumbre asociada a pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor.

Aun cuando estas variables mencionadas son las que más contribuyen, esto se debe principalmente a los coeficientes de sensibilidad más que a las variables de las cuales dependen.

En este ejercicio en particular se visualiza que los instrumentos de medición utilizados realmente no contribuyen de manera significativa al resultado final de la prueba. Sin embargo es importante recordar que el analizador de potencia que juega un papel muy importante en la prueba no está calibrado, esto implica que la incertidumbre considerada para este instrumento solamente fue la debida a su resolución, si se hubiese tomado la del informe de calibración muy probablemente la contribución sería mayor repercutiendo en varias de las variables encontradas y por consecuencia en la incertidumbre final.

En la gráfica se pueden observar que hay variables cuya contribución de incertidumbre es mínima incluso en un momento dado se pueden despreciar.

Es importante estar conscientes que los resultados de esta prueba son de un laboratorio en particular por lo tanto se debe tener presente que cuando se aplique esta metodología en otro laboratorio van a variar las condiciones de la prueba debido principalmente al tipo de equipos e instrumentos de medición utilizados.

Queremos resaltar que aunque esta prueba se basa en un método de norma generalmente válido, la forma particular de aplicarlo de este laboratorio implicaría que en consideraciones estrictas se debería validar, esto haría que los resultados obtenidos fueran más confiables.

Bibliografía y Referencias

- [1] Ley Federal Sobre Metrología y Normalización. Última publicación en el Diario Oficial de la Federación, del 20 de mayo de 1997.
- [2] Entidad Mexicana de Acreditación A.C (ema). Políticas referente a la trazabilidad e incertidumbre de mediciones. Serie documentos.
- [3] NOM-016-ENER-2002 "Eficiencia energética de motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, en potencia nominal de 0,746 a 373 kW: límites, método de prueba y marcado"
- [4] Lazos M. R Schmid W. 2000 *Guía para estimar la incertidumbre de la medición*, Centro Nacional de Metrología. El Marques, Qro.
- [5] Reglamento de la Ley federal Sobre Metrología y Normalización. Emitido por el Poder Ejecutivo Federal, el 13 de enero de 1999.
- [6] NMX-CH-140-IMNC-2002. Guía para la expresión de las incertidumbres en las mediciones.
- [7] NMX-Z-055-IMNC-1997. *Metrología- vocabulario de términos fundamentales y generales.*
- [8] Carranza R. L. 2003 *Documento de trabajo* Centro Nacional de Metrología
- [9] NMX-EC-17025-IMNC-2000 *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración* Instituto Mexicano de Normalización y Certificación A.C.
- [10] Figueroa E. J. 1997. *Análisis estadístico de datos y reporte de incertidumbres.* Publicación técnica CNM-MED-PT-001. Centro Nacional de Metrología, Dirección de metrología Eléctrica. Los Cués, Qro., México.
- [11] Pezet F. Mendoza J. 1997. *Vocabulario internacional de términos fundamentales y generales de metrología.* CNM-MMM-PT-001 Centro Nacional de Metrología (CENAM) Área de Metrología Mecánica
- [12] Pérez A. V. 1991 *Generadores motores y transformadores eléctricos* Universidad nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería
- [13] Centro Nacional de Metrología (CENAM). Simposio de metrología 2002 Memorias;2002 mayo 29-30; México(Santiago de Querétaro, Qro.)

- [14] Sarabia M. Curso básico para el cálculo de incertidumbres en las mediciones; 1999. México; Cateysa, S.C. calidad y metrología.
- [15] González Requerimientos QS 9000 1998. Primera Edición. McGraw Hill Interamericana editores, S.A. de C.V.
- [16] Link W. Enero 2000 Expresión de la incertidumbre en la medición, Metrología Mecánica. Instituto de Metrología Mitutoyo.
- [17] Devore J. 2001 Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Quinta Edición. México: International thomson editores, S.A. de C.V. Traducción de la quinta edición de: Probability and statistics for engineering and the Sciences.
- [18] Mendenhall W. 1987. Introducción a la probabilidad y estadística. México: Grupo Editorial Iberoamérica, S.A. de C.V. Traducción de la quinta edición de: Probability and statistics.
- [19] Miller J. Freund J. Johnson R. 1992. Probabilidad y estadística para ingenieros. 4ª Edición. México: Iwin Miller , Richard, Prentice may Hispanoamericana, S.A. Traducción de la 4ª edición de probability and Statistics for engineers
- [20] NOM-014-ENER-1997, Eficiencia energética de motores de corriente alterna, monofásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, de uso general en potencia nominal de 0,180 a 1,500 kW. Límites, método de prueba y marcado.

Anexo 1

Criterios de aceptación.

La eficiencia determinada, para cada motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla probado, debe ser igual o mayor que la eficiencia mínima asociada a la eficiencia nominal marcada en la placa de datos por el fabricante.

Tabla 3.- Valores de eficiencia nominal a plena carga para motores verticales y horizontales, en por ciento

Potencia Nominal , kW	Potencia Nominal Cp	MOTORES CERRADOS				MOTORES ABIERTOS			
		2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos	2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos
0,746	1	75,5	82,5	80,0	74,0	75,5	82,5	80,0	74,0
1,119	1,5	82,5	84,0	85,5	77,0	82,5	84,0	84,0	75,5
1,492	2	84,0	84,0	86,5	82,5	84,0	84,0	85,5	85,5
2,238	3	85,5	87,5	87,5	84,0	84,0	86,5	86,5	86,5
3,730	5	87,5	87,5	87,5	85,5	85,5	87,5	87,5	87,5
5,595	7,5	88,5	89,5	89,5	85,5	87,5	88,5	88,5	88,5
7,460	10	89,5	89,5	89,5	88,5	88,5	89,5	90,2	89,5
11,19	15	90,2	91,0	90,2	88,5	89,5	91,0	90,2	89,5
14,92	20	90,2	91,0	90,2	89,5	90,2	91,0	91,0	90,2
18,65	25	91,0	92,4	91,7	89,5	91,0	91,7	91,7	90,2
22,38	30	91,0	92,4	91,7	91,0	91,0	92,4	92,4	91,0
29,84	40	91,7	93,0	93,0	91,0	91,7	93,0	93,0	91,0
37,30	50	92,4	93,0	93,0	91,7	92,4	93,0	93,0	91,7
44,76	60	93,0	93,6	93,6	91,7	93,0	93,6	93,6	92,4
55,95	75	93,0	94,1	93,6	93,0	93,0	94,1	93,6	93,6
74,60	100	93,6	94,5	94,1	93,0	93,0	94,1	94,1	93,6
93,25	125	94,5	94,5	94,1	93,6	93,6	94,5	94,1	93,6
111,9	150	94,5	95,0	95,0	93,6	93,6	95,0	94,5	93,6
149,2	200	95,0	95,0	95,0	94,1	94,5	95,0	94,5	93,6
186,5	250	95,4	95,0	95,0	94,5	94,5	95,4	95,4	94,5
223,8	300	95,4	95,4	95,0	---	95,0	95,4	95,4	---
261,1	350	95,4	95,4	95,0	---	95,0	95,4	95,4	---
298,4	400	95,4	95,4	---	---	95,4	95,4	---	---
335,7	450	95,4	95,4	---	---	95,8	95,8	---	---
373	500	95,4	95,8	---	---	95,8	95,8	---	---

Anexo 2

Distribuciones de probabilidad

Distribuciones de probabilidad

La cuantificación de una fuente de incertidumbre incluye la asignación de un valor y la determinación de la distribución a la cual se refiere este valor. Las distribuciones que aparecen mas frecuentemente son:

Distribución normal

Los resultados de una medición repetida afectada por una o mas magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, generalmente siguen en buena aproximación una distribución normal. También la incertidumbre indicada en certificados de calibración se refiere generalmente a una distribución normal.

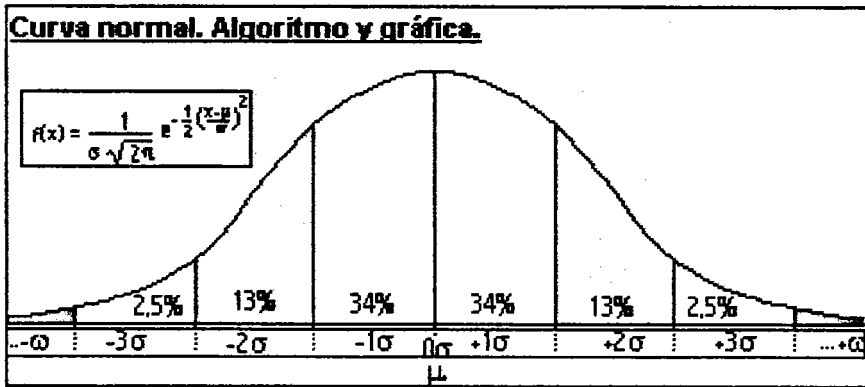
La curva de distribución normal describe la distribución de muchos de los conjuntos de datos que ocurren en la naturaleza, la industria y la investigación.

La desviación estándar experimental de la media sirve para calificar cuando un valor medio \bar{x} representa una magnitud a ser medida X . Esta estimación es tanto mejor cuanto mayor es el número de repeticiones efectuadas de la medición.

Características de la distribución normal de la probabilidad.

- ☞ La curva tiene un solo pico, por consiguiente es unimodal. Presenta una forma de campana.
- ☞ La media de una población distribuida normalmente se encuentra en el centro de su curva normal.
- ☞ A causa de la simetría de la distribución normal de probabilidad, la mediana y la moda de la distribución también se hallan en el centro, por tanto en una curva normal, la media, la mediana y la moda poseen el mismo valor.
- ☞ Las dos colas (extremos) de una distribución normal de probabilidad se extienden de manera indefinida y nunca tocan el eje horizontal.

En la siguiente figura se puede visualizar los diferentes niveles de probabilidad dentro de la curva de distribución normal.

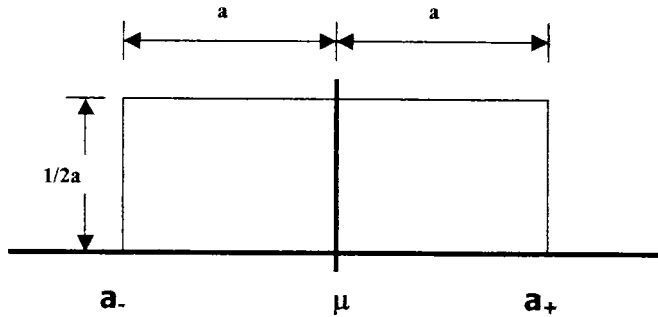


Donde:

- e** es la constante 2,7182... (base de los logaritmos neperianos).
- p** es 3,1415... (relación entre la longitud de la circunferencia y su diámetro).
- x** es la abscisa, cualquier punto del intervalo.
- m** es la mediana de la variable aleatoria.
- s** es la desviación tipo de la variable aleatoria, y
- f(x)** la ordenada de la curva.

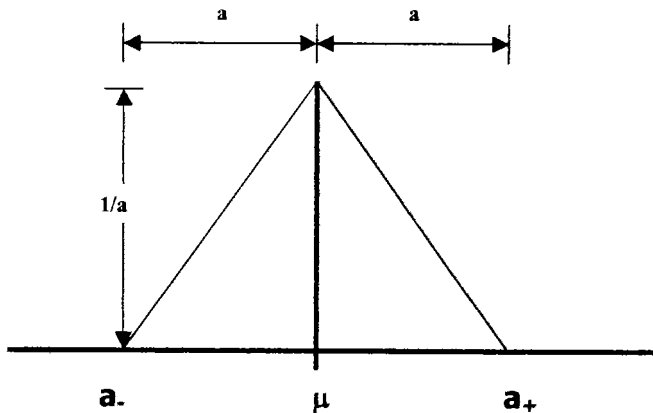
Distribución rectangular:

En una distribución rectangular cada valor en un intervalo dado tiene la misma probabilidad, o sea la función de densidad de probabilidad es constante en este intervalo, por ejemplo la resolución de un instrumento digital o la información técnica sobre tolerancias de un instrumento. En general cuando exclusivamente hay conocimiento de los límites superior e inferior del intervalo de variabilidad de la magnitud de entrada, lo mas conservador es suponer una distribución rectangular.



Distribución triangular

Si además del conocimiento de los límites superior e inferior hay evidencia de que la probabilidad es mas alta para valores en el centro del intervalo y se reduce hacia los límites, puede ser mas adecuado basar la estimación de la incertidumbre en una distribución triangular.



Distribución t de student

Frecuentemente, los valores del mesurando siguen una distribución normal, sin embargo el mejor estimado del mensurando, la media (obtenida por muestreos de n mediciones repetidas) dividida entre su desviación estándar, sigue una distribución llamada t de student, la cual refleja las limitaciones de información disponible debidas al número finito de mediciones. Esta distribución coincide con la distribución normal en el límite cuando n tiende a infinito, pero difiere considerablemente de ella cuando n es pequeño.

La distribución t de student es caracterizada por un parámetro v llamado número de grados de libertad.

Es común, que se desconozca tanto la varianza como la media de la población. Esta situación representaría un problema respecto a la construcción de los intervalos de confianza.

De acuerdo al teorema del límite central que establece que, bajo condiciones bastante generales, la sumas y las medias de muestras de observaciones aleatorias extraídas de una población tienden a presentar una distribución aproximadamente normal cuando se repite el muestreo muchas veces: si se seleccionan al azar muestras de n observaciones de una población con una media finita y desviación estándar, entonces cuando n es grande, la media muestral tiene una distribución aproximadamente normal con media igual a μ y desviación estándar $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$. La aproximación se vuelve mas precisa a medida que aumenta n .

$$Z = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$$

tiene una distribución normal cuando n es grande. Si una población tiene una distribución normal o sigue aproximadamente una distribución normal cuando n es muy grande, independientemente de la forma funcional de la población, no se puede hacer uso de este hecho, porque σ se desconoce. Sin embargo, se puede usar la desviación estándar de la muestra s como una aproximación de σ es muy importante, por lo que se justifica la teoría de la distribución normal para construir un intervalo de confianza para la media la población.

Sin embargo, cuando se tienen muestras pequeñas es necesario encontrar otro procedimiento para construir intervalos de confianza, debido a que no se dispone de suficientes datos para hacer una buena estimación de σ una alternativa es la distribución t de student.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

La distribución t tiene las siguientes propiedades.

- ⇒ Tiene una media de 0
- ⇒ Es simétrica con respecto a la media.
- ⇒ En general, tiene una varianza mayor que 1, pero esta tiende a 1 a medida que aumenta el tamaño de la muestra.
- ⇒ La variable t se encuentra definida en el intervalo de $-\alpha$ a $+\alpha$,
- ⇒ La distribución t es realmente una familia de distribuciones, puesto que hay una distribución diferente por cada valor de la muestra n-1(grados de libertad)
- ⇒ La distribución t se aproxima a la distribución normal a medida que n-1 se aproxima al infinito.

La distribución t al igual que la distribución normal se encuentra tabulada; para hacer uso de estas tablas, se debe tomar en cuenta el nivel de confianza y los grados de libertad. El requisito para utilizar la distribución t, es que la muestra debe ser extraída de una población con distribución normal. Sin embargo, la experiencia a demostrado que se pueden tolerar desviaciones moderadas de la normalidad. Como consecuencia, la distribución t se utiliza incluso cuando se sabe que la población original se desvía de la normalidad, gracias al teorema del limite central.

Anexo 3

Cálculo de la desviación estándar para la distribución rectangular.

Partiendo de la expresión por medio de la cual se calcula la desviación estándar.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}$$

El cuadrado de la desviación estándar s^2 , es llamado varianza. Si el número de datos n es muy grande y si los datos está distribuidos de manera continua, la suma puede ser sustituida por una integral, obteniéndose la varianza como:

$$s^2 = \int_{-\alpha}^{\alpha} (x - \bar{x})^2 \cdot p(x) dx$$

donde $p(x)$ es la función de densidad de probabilidad de X , y \bar{x} es la media de los datos:

$$\bar{x} = \int_{-\alpha}^{\alpha} x \cdot p(x) dx$$

Cuando es una distribución rectangular cada valor de x dentro del intervalo $[a_-, a_+]$ tiene la misma probabilidad, o sea la densidad de probabilidad $p(x)$ es constante:

$$p(x) = \begin{cases} \frac{1}{a} & \text{para } a_- \leq x \leq a_+ \\ 0 & \text{para } x < a_- \text{ y } x > a_+ \end{cases} \quad \text{Donde } a = a_+ - a_-$$

La media \bar{x} resulta:

$$\bar{x} = \int_{a_-}^{a_+} x \cdot \frac{1}{a} dx = \frac{1}{a} \cdot \frac{x^2}{2} \Big|_{a_-}^{a_+} = \frac{1}{2a} \cdot (a_+^2 - a_-^2) = \frac{1}{2a} \cdot (a_+ - a_-)(a_+ + a_-) = \frac{1}{2a} \cdot a \cdot (a_+ + a_-) = \frac{(a_+ + a_-)}{2}$$

La varianza s^2 se calcula:

$$s^2 = \int_{a_-}^{a_+} (x - \bar{x})^2 \cdot \frac{1}{a} dx = \frac{1}{a} \cdot \frac{(x - \bar{x})^3}{3} \Big|_{a_-}^{a_+} = \frac{1}{3a} \left[(a_+ - \bar{x})^3 - (a_- - \bar{x})^3 \right] = \frac{1}{3a} \left[\left(\frac{a}{2}\right)^3 - \left(-\frac{a}{2}\right)^3 \right]$$
$$= \frac{1}{3a} \cdot \frac{a^3}{4} = \frac{a^2}{12}$$

Por lo tanto la desviación estándar resulta:

$$s = \frac{a}{\sqrt{12}} = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}}$$

Que también se puede expresar:

$$S = \frac{a}{2\sqrt{3}}$$

Anexo 4

Definiciones y Nomenclatura

Motor de inducción

Es un motor eléctrico en el cual solamente una parte, el rotor o el estator, se conecta a la fuente de energía y la otra trabaja por inducción electromagnética.

Motor eléctrico

Es una máquina rotatoria para convertir energía eléctrica en mecánica.

Motor trifásico

Es un motor que utiliza para su operación energía eléctrica de corriente alterna trifásica.

Motor tipo jaula de ardilla

Es un motor de inducción, en el cual los conductores del rotor son barras colocadas en las ranuras del núcleo secundario, que se conectan en circuito corto por medio de anillos en sus extremos semejando una jaula de ardilla.

Eficiencia

La eficiencia se define como la razón entre la potencia de salida y la potencia de Entrada del motor.

Se expresa en porcentaje y se calcula con alguna de las siguientes relaciones:

- (a) $[\text{Potencia de salida} / \text{potencia de entrada}] \times 100,$
- (b) $[(\text{Potencia de entrada} - \text{pérdidas}) / \text{potencia de entrada}] \times 100,$
- (c) $[\text{Potencia de salida} / (\text{potencia de salida} + \text{pérdidas})] \times 100.$

Pérdidas en el núcleo

Son las debidas a las alternaciones del campo magnético en el material activo del estator y el rotor por efectos de histéresis y corrientes parásitas.

Pérdidas indeterminadas

Son la porción de las pérdidas que no se incluyen en la suma de las pérdidas por efecto Joule en el estator y en el rotor, las pérdidas en el núcleo, y las pérdidas por fricción y ventilación.

Pérdidas por efecto Joule

Son las debidas a la circulación de corriente eléctrica por los conductores del estator y rotor y se manifiestan en forma de calor.

Pérdidas por fricción y ventilación

Son las debidas a la oposición que presentan los dispositivos tales como ventiladores y rodamientos al movimiento mecánico.

Incertidumbre de medición

Parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que podrían atribuirse razonablemente al mensurando.

Evaluación (de incertidumbre) tipo A

Método para evaluar la incertidumbre mediante el análisis estadístico de una serie de observaciones.

Evaluación (de incertidumbre) tipo B

Método para evaluar la incertidumbre por otro medio que no sea el análisis estadístico de una serie de observaciones. Esta incertidumbre también es llamada incertidumbre de los patrones y se puede obtener a partir de informes de calibración o datos de fabricante o distribuidor.

Incertidumbre Combinada

Es la incertidumbre del resultado de una medida, expresada como la desviación estándar de la suma de diferentes magnitudes (varianzas o covarianzas), y ponderadas por su variación en los resultados obtenidos. Esta incertidumbre se obtiene con ayuda de la ley de propagación de incertidumbres, o propagación de errores.

Incertidumbre Expandida

Es la magnitud que define el intervalo (de una medida), dentro del cual se espera que los valores atribuibles a la medición se encuentren con un alto grado de confianza.

Factor de cobertura

Factor numérico, utilizado como multiplicador de la incertidumbre típica, para obtener la incertidumbre expandida. Los valores que puede tomar k se pueden

seleccionar entre 2 y 3 o mas, según la amplitud de los riesgos, por convención se utiliza generalmente un valor de $k=2$

Nomenclatura

- A Pendiente de la recta para el análisis de regresión lineal.
- B Intersección de la recta con el eje de las ordenadas para el análisis de regresión lineal.
- I_0 Promedio de las corrientes de línea con el motor operando en vacío, en A
- I_m Promedio de las corrientes de línea para cada punto de carga, en A
- I^2_{RE0} Pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator para la operación en vacío del motor, en kW
- I^2_{Rm} Pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator para cada punto de carga, en kW
- I^2_{Rmc} Pérdidas por efecto Joule en los devanados del estator para cada punto de carga, referidas a una temperatura ambiente de 25°C, en kW
- I^2_{Rr} Pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor para cada punto de carga, en kW
- I^2_{Rrc} Pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor para cada punto de carga, referidas a una temperatura ambiente de 25°C en kW
- K Constante del material de los devanados del estator
- n_m Frecuencia de rotación para cada punto de carga, en min^{-1}
- n_0 Frecuencia de rotación en vacío, en min^{-1}
- n_s Frecuencia de rotación síncrona, en min^{-1}
- P_0 Potencia de entrada con el motor operando en vacío, en kW
- P_d Potencia demandada al motor bajo prueba por el dinamómetro a su carga mínima, en kW
- P_e Potencia de entrada para cada valor de carga, en kW
- P_{fv} Pérdidas por fricción y ventilación, en kW
- P_h Pérdidas en el núcleo, en kW
- P_{ind} Pérdidas indeterminadas, en kW
- P_{res} Potencia residual para cada punto de carga, en kW
- P_s Potencia de salida corregida para cada punto de carga, en kW

ANEXO 5

NOM - 016 - 2001

DATOS

Pe	19,975
Ps	18,54
Po	0,574
Ph	0,31
Pfv	0,183
Pind	0,1603
I2Rmc	0,5135
I2Rrc	0,2668
I2Reo	0,08
Io	13,25
to	49,5
ti	16
Ri	0,2706
Tc	100,07
A	0,016
No	1800
K	234,5

DATOS

tmin	55,5
2P	4
Im	30,54
Rmc	0,367
tr	78
Rf	0,3624
Smc	0,0139
Tm	99,601
Sm	0,0138
nm	1775
ns	1800
tc	100
tm	79
Reo	0,3067
Psc	18,5414
e	0,9283

u2Pe	2,88765
U2Im	2,88765
U2Io	2,88765
U2Po	2,88765
Uanalizador	2,88765
Utermometro	0,34
Utermometro2	0,34
Umicro-ohmetr	0,016
Utorquimetro	0,00047
Utacometro	0,167

TABLA1. DATOS CORRESPONDIENTES A CURVA DE VACIO PARA DETERMINACION DE Pfv y Ph

Punto Número	Valor de Voltaje al Cuadrado (Abcisas)	Valor de potencia en vacío
1	52854,01	0,246
2	40000	0,231
3	28900	0,223
4	19656,04	0,201
5	12100	0,196
6	6400	0,193
7	3624,04	0,185
sumatoria	26743398592	
sumatoria ^2	5815619947	

Y = AX +B (Ecuación de la recta)

Pendiente A =	1,23096	1,23096E-06
B = Pfv =	0,183	
Correlación:	0,9885751	

TABLA 2. DATOS CORRESPONDIENTES A PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO PARA DETERMINACIÓN DE Pind

Punto Número	Torque corregido al cuadrado	Potencia Residual Pres
1	22807,04	0,372
2	15590,0196	0,268
3	10014,0049	0,138
4	5543,993764	0,098
5	2430,884416	0,056
6	601,181361	0,013
sumatoria	3247532306	
sumatoria ^2	900496563,8	

Y = AX + B (Ecuación de la recta)
 Pendiente A = 1,60228
 B = Intersección = 0,00577

1,60228E-05
 Correlación: 0,9942

1. Obtener la incertidumbre asociada a ns

$$ns = 120F / 2P$$

$$\partial ns / \partial F = 30$$

$$U_{cns} = \sqrt{((\partial ns / \partial F)^2 U_f^2)} \quad \Rightarrow \quad \underline{\quad\quad\quad 0}$$

2. Obtener la incertidumbre asociada a Sm

$$Sm = ((ns - nm)/ns) \quad \partial Sm / \partial ns = nm / ns^2 \quad \Rightarrow \quad 0,00054784$$

$$\partial Sm / \partial nm = -1 / ns \quad \Rightarrow \quad -0,000555556$$

$$U_{csm} = \sqrt{(((\partial Sm / \partial ns)^2) U_{ns}^2) + (((\partial Sm / \partial nm)^2) U_{nm}^2)}$$

$$\Rightarrow \quad \underline{\quad 4,6E-05 \quad}$$

3. Obtener la incertidumbre asociada a Smc

$$Smc = Sm ((tc + k) / (tm + k))$$

$$\partial Smc / \partial Sm = (tc + k) / (tm + k) \quad \Rightarrow \quad 1,066985646$$

$$\partial Smc / \partial tc = Sm / (tm + k) \quad \Rightarrow \quad 4,40191E-05$$

$$\partial Smc / \partial tm = -Sm (tc+k) / (tm + k)^2 \quad \Rightarrow \quad -4,69878E-05$$

$$U_{csmc} = \sqrt{(((\partial Smc / \partial Sm)^2) U_{sm}^2) + (((\partial Smc / \partial tc)^2) U_{tc}^2) + (((\partial Smc / \partial tm)^2) U_{tm}^2)}$$

$$\Rightarrow \quad \underline{\quad 5,1E-05 \quad}$$

4. Obtener la incertidumbre asociada a Rmc

$$Rmc = Rf ((tc+k) / (tf + k))$$

$$\partial Rmc / \partial Rf = (tc + k) / (tf + k) \quad \Rightarrow \quad 1,077294686$$

$$\partial Rmc / \partial tf = -Rf ((tc + k) / ((tf + k)^2)) \quad \Rightarrow \quad -0,001257364$$

$$\partial Rmc / \partial tc = Rf / (tf + k) \quad \Rightarrow \quad 0,00116715$$

$$UcRmc = \sqrt{ \{ [(\partial Rmc / \partial Rf)^2 * URf^2] + [(\partial Rmc / \partial tc)^2 * Utc^2] + [(\partial Rmc / \partial tf)^2 * Utf^2] \} } \\ \Rightarrow \quad \underline{\underline{0,00862}}$$

5. Obtener la incertidumbre asociada a I2Rmc

$$I2Rmc = 0.0015 Im^2 Rmc$$

$$\partial I^2 Rmc / \partial Im = 0.003 Im Rmc \quad \Rightarrow \quad 0,03362454$$

$$\partial I^2 Rmc / \partial Rmc = 0.0015 Im^2 \quad \Rightarrow \quad 1,3990374$$

$$UcI^2 Rmc = \sqrt{ \{ [(\partial I^2 Rmc / \partial Im)^2 * UIm^2] + [(\partial I^2 Rmc / \partial Rmc)^2 * URmc^2] \} } \\ \Rightarrow \quad \underline{\underline{0,012064306}}$$

6. Obtener la incertidumbre asociada a I2Rrc

$$I^2 Rrc = (Pe - I^2 Rmc - Ph) Smc$$

$$\partial I^2 Rrc / \partial Pe = Smc \quad \Rightarrow \quad 0,0139$$

$$\partial I^2 Rrc / \partial I^2 Rmc = - Smc \quad \Rightarrow \quad -0,0139$$

$$\partial I^2 Rrc / \partial Ph = - Smc \quad \Rightarrow \quad -0,0139$$

$$\partial I^2 Rrc / \partial Smc = (Pe - I^2 Rmc - Ph) \quad \Rightarrow \quad 19,65293569$$

$$UcI^2 Rrc = \sqrt{ \{ [(\partial I^2 Rrc / \partial Pe)^2 * UPe^2] + [(\partial I^2 Rrc / \partial Rmc)^2 * UI^2 Rmc^2] + [(\partial I^2 Rrc / \partial Ph)^2 * UPh^2] + [(\partial I^2 Rrc / \partial Smc)^2 * USmc^2] \} } \\ \Rightarrow \quad \underline{\underline{0,001010253}}$$

7. Obtener la incertidumbre asociada a Reo

$$Reo = (Ri * (to + k)) / (ti + k)$$

$$\partial Reo / \partial Ri = (to+k)/(ti+k) \quad \Rightarrow \quad 1,133732535$$

$$\partial \text{Reo} / \partial t_0 = R_i / (t_i + k) \quad \Rightarrow \quad 0,00108024$$

$$\partial \text{Reo} / \partial t_i = (-R_i / (t_0 + k)) / ((t_i + k)^2) \quad \Rightarrow \quad -0,001224703$$

$$U_{c\text{Reo}} = \sqrt{\{ [(\partial \text{Reo} / \partial R_i)^2 * U_{R_i}^2] + [(\partial \text{Reo} / \partial t_0)^2 * U_{t_0}^2] + [(\partial \text{Reo} / \partial t_i)^2 * (U_{t_i}^2)] \}} \\ \Rightarrow \quad \underline{0,009074108}$$

8. Obtener la incertidumbre asociada a I2Reo

$$I2\text{Reo} = 0,0015 * I_0^2 \text{Reo}$$

$$\partial I2\text{Reo} / \partial I_0 = 0,003 * I_0 \text{Reo} \quad \Rightarrow \quad 0,012191325$$

$$\partial I2\text{Reo} / \partial \text{Reo} = 0,0015 * I_0^2 \quad \Rightarrow \quad 0,26334375$$

$$U_{cI2\text{Reo}} = \sqrt{\{ [(\partial I2\text{Reo} / \partial I_0)^2 * U_{I_0}^2] + [(\partial I2\text{Reo} / \partial \text{Reo})^2 * U_{\text{Reo}}^2] \}} \\ \Rightarrow \quad \underline{0,00238961}$$

9. Obtener la incertidumbre asociada a Pfv.

9.1 de la ecuación ajustada por mínimos cuadrados

$$Y = Ax + b$$

* Se tomo la ecuación del anexo H3 de la norma

NMX-CH-140-IMNC-2002 considerando las varianzas

$$S = \sqrt{\sum ((Y_i - b - Ax)^2) / (n-2)} \quad \Rightarrow \quad 0,003947188$$

$$S(b) = SP_{fv} = UP_{fv} = S \sqrt{(\sum X_i^2 / n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2)} \quad \Rightarrow \quad \underline{0,002547128}$$

10. Obtener la incertidumbre asociada a Ph

$$UP_h = \sqrt{U_{p_0}^2 + U_{p_{fv}}^2 + UI2\text{Reo}^2} \quad \Rightarrow \quad \underline{0,003492577}$$

11. Obtener la incertidumbre asociada a Pind

$$S^2(Y_2) = S_{pin} = nS^2/D = nS^2 / (n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2)$$

$$S \quad \Rightarrow \quad 0,016555403$$

$$S^2 P_{ind} \quad \Rightarrow \quad 7,62945E-13$$

$$UP_{ind} \quad \Rightarrow \quad \underline{8,73467E-07}$$

12. Obtener la incertidumbre asociada a Psc

$$P_{sc} = P_e - P_n - P_{fv} - P_{ind} - I^2 R_{mc} - I^2 R_{rc}$$

$$U_{cP_{sc}} = \sqrt{(U_{Pe}^2 + U_{Ph}^2 + U_{Pfv}^2 + U_{Pind}^2 + U_{I^2 R_{mc}}^2 + U_{I^2 R_{rc}}^2)}$$
$$=> \underline{\underline{0,012106531}}$$

13. Obtener la incertidumbre asociada a Π

$$\Pi = (P_{sc} / P_e) * 100$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial P_{sc}} = 100 / P_e \quad => \quad 5,006257822$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial P_e} = (P_{sc} * 100) / P_e^2 \quad => \quad 4,646960139$$

$$U_{c\Pi} = \sqrt{((\frac{\partial \Pi}{\partial P_{sc}})^2 U_{P_{sc}}^2) + ((\frac{\partial \Pi}{\partial P_e})^2 U_{P_e}^2)}$$

$$=> \underline{\underline{0,060608417}}$$

$$U_{cn} = + / - \underline{\underline{0,121216833}}$$