



INSTITUTO SUPERIOR
MINERO METALÚRGICO DE MOA
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ

Facultad: Metalurgia-Electromecánica
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Trabajo de Diploma

En opción al Título de

Ingeniero Eléctrico

*Título: Sistema de mediciones en el
accionamiento de la bomba centrífuga del
ISMMM.*

Autor: Luis Ángel Guzmán Velázquez

Tutor: Ms. C. Nilka Hernández Diéguez

Moa -2017
“Año 59 de la Revolución”

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo:

Diplomante: Luis Ángel Guzmán Velázquez

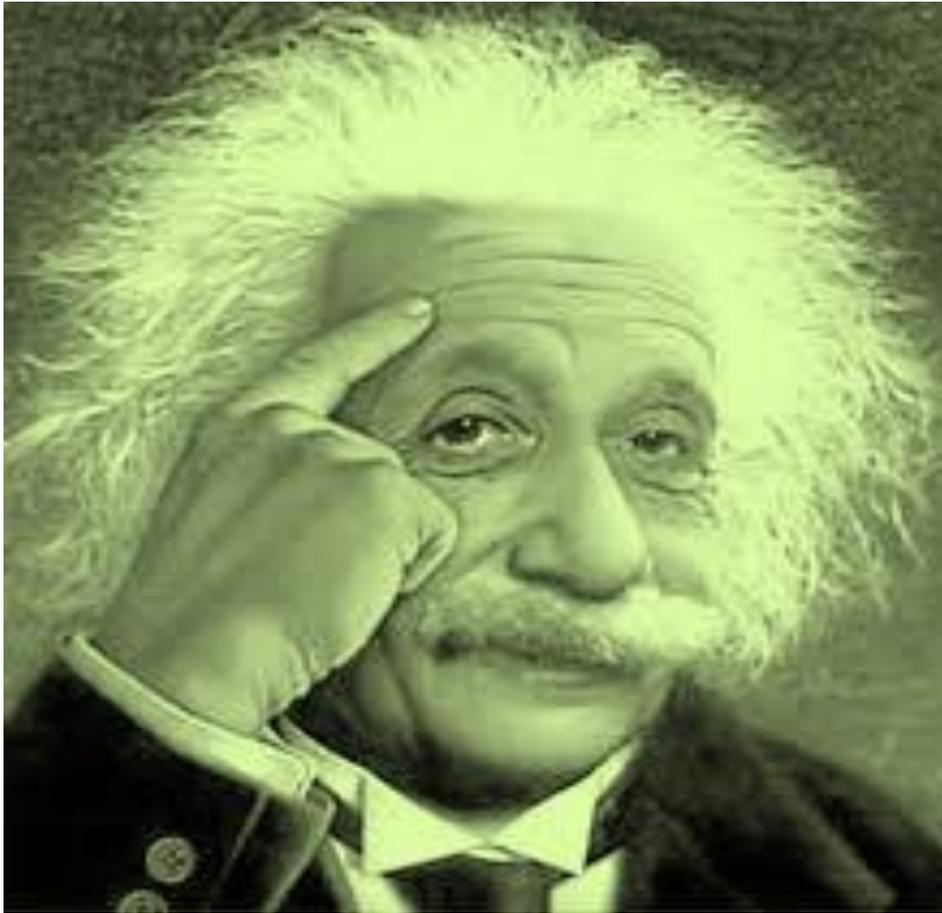
Tutores: Ms. C. Nilka Hernández Diéguez

Autor del Trabajo de Diploma:

Certifico la propiedad intelectual del trabajo de diploma “Sistema de mediciones en el accionamiento de la bomba centrífuga del ISMMM” a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM), Dr. Antonio Núñez Jiménez, el cual podrá hacer uso del mismo para fines educativos y docentes.

Luis Ángel Guzmán Velázquez
(Diplomante)

Ms. C. Nilka Hernández Diéguez
(Tutor)



Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber...

Albert Einstein.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado en especial a mis padres, Luis Enrique guzmán Román y Arelis Velázquez Velázquez, quienes han consagrado más de 23 años a instruirme, guiarme, y darme todo el amor que se le puede dar a un hijo, de ahí que es el premio a su esfuerzo y mi sueño en forjarme como profesional. A mis hermanos Yuliet Reynaldo Velázquez y Juan Carlos Ricardo Velázquez, los cuales pasaron por esta etapa y fueron mis guías y ejemplo a seguir, a mi tía Moraima Guzmán Román quien me apoyo en todo lo que necesite, a mi primo Casli, al resto de mi familia que es lo más bonito que tengo, a mis amigos, en fin a todas aquellas personas que de una u otra forma aportaron su granito de arena para culminar satisfactoriamente los estudios de mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a mis padres por su esfuerzo y empeño en mi formación como ingeniero, al brindarme las herramientas que me han permitido desarrollarme y ser mejor persona cada día. A mis familiares que han estado pendientes de mí dando su apoyo incondicional. A todos mis compañeros de aula y amigos, con los cuales he compartido en esta faceta de mi vida, a mi equipo de estudio (Yoendry, yonky, La figura, franki y John), su dedicación, consejos y apoyo fue incondicional para llegar hasta acá. A mis profesores por compartir sus conocimientos y experiencias, en especial a mi tutora Nilka Hernández Diéguez por su empeño en la realización de este trabajo al dedicarme parte de su tiempo cuando lo necesite, mi eterno agradecimiento (...)

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo evaluar la incertidumbre asociada a los resultados de las mediciones obtenidas con el nuevo equipamiento portátil asistido por el (CEETAM) para el sistema de bombeo del ISMM, con el propósito de poder evaluar la fiabilidad de estos resultados y la calidad metrológica del equipamiento empleado. Para ello fue necesario primeramente identificar aquellas magnitudes que influyen significativamente en el resultado de la incertidumbre y segundo desarrollar el procedimiento de cálculo de la incertidumbre de las magnitudes identificadas y la de eficiencia estimada, identificada como la magnitud sobre la cual recae el análisis concluyente de la incertidumbre. Los resultados obtenidos de los cálculos realizados muestran una eficiencia de $\eta = 0.8$ con una variación posible de ± 0.1 , dando un intervalo de confianza del 95%, comprendido entre 0.7 y 0.9 demostrando la fiabilidad de las mediciones y la calidad metrológica de los instrumentos. Basado en los resultados del trabajo se concluye que la instrumentación puede ser utilizada tanto en la toma de decisiones como en el diagnóstico, pronóstico y seguimiento de fallas.

SUMMARY

This work aims to evaluate the uncertainty associated with the results of the measurements obtained with the new portable equipment assisted by the Study Center for the pumping system of the ISMM, in order to be able to evaluate the reliability of these results and the metrological quality of the equipment used. It was necessary first to identify those magnitudes that significantly influence the result of the uncertainty and second to develop the procedure for calculating the uncertainty of the magnitudes identified and the estimated efficiency, identified as the magnitude on which the conclusive analysis of the uncertainty. The results obtained from the calculations show an efficiency of $\eta = 0.8$ with a possible variation of ± 0.1 , giving a confidence interval of 95%, between 0.7 and 0.9, demonstrating the reliability of the measurements and the metrological quality of the instruments. Based on the results of the work, it is concluded that the instrumentation can be used in decision-making as well as in the diagnosis, prognosis and follow up of failures.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
--------------------	---

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL	4
--------------------------------	---

Introducción	4
--------------------	---

1.1. Error e incertidumbre de medida	4
--------------------------------------------	---

1.1.1. Causas de error en las mediciones	6
------------------------------------------------	---

1.1.2. Definición de la incertidumbre	9
---------------------------------------------	---

1.1.3. Evaluación de la incertidumbre	10
---------------------------------------------	----

1.1.4. Especificación de la magnitud	10
--------------------------------------------	----

1.1.5. Cálculo de la incertidumbre combinada	14
----------------------------------------------------	----

1.2. Instrumentos utilizados para el análisis de motores y sus esquemas de mediciones	18
---------------------------------------------------------------------------------------	----

1.2.1. Análisis de la temperatura	18
-----------------------------------------	----

1.2.2. Análisis de la resistencia de aislamiento	20
--------------------------------------------------------	----

1.2.3. Empleo de los analizadores de redes eléctricas	22
-------------------------------------------------------------	----

1.2.4. El Multímetro Digital	24
------------------------------------	----

1.2.5. Tacómetro digital	25
--------------------------------	----

1.3. Conclusiones del capítulo I	27
----------------------------------------	----

CAPÍTULO II

EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL SISTEMA DE MEDICIÓN EMPLEADO EN EL MOTOR QUE ACCIONA LA BOMBA DE AGUA DEL ISMMM	28
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Introducción	28
--------------------	----

2.1. Caracterización de la instrumentación utilizada	28
------------------------------------------------------------	----

2.1.1. Medición de Aislamiento (Megger)	28
-----------------------------------------------	----

2.1.2. Pirómetro infrarrojo (medidor de temperatura)	30
------------------------------------------------------------	----

2.1.3. Analizador de redes eléctricas	32
---------------------------------------------	----

2.2. Evaluación de la Incertidumbre de las mediciones realizadas en el motor del ISMM con el analizador de redes	33
2.2.1. Incertidumbre en la determinación de la velocidad.....	33
2.2.2. Incertidumbre para las corrientes del circuito equivalente	36
2.2.3. Incertidumbre para las pérdidas y potencias principales	37
2.2.4. Incertidumbre en la eficiencia	39
2.3. Evaluación de la Incertidumbre de las mediciones en el motor del ISMM con el pirómetro y el Megger	40
2.4 Conclusiones del capítulo II.....	40

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	41
Introducción	41
3.1. Caracterización de la instalación.....	41
3.2. Análisis de la Incertidumbre para estimar la temperatura y resistencia de aislamiento	42
3.3. Análisis de la incertidumbre para la medición de la eficiencia	43
3.3.1. Incertidumbre para las corrientes del circuito equivalente del motor	44
3.3.2. Incertidumbre para la potencia de entrada.....	45
3.3.3. Incertidumbre para las pérdidas y potencias principales del motor	46
3.3.4. Incertidumbre en la eficiencia	48
3.4. Conclusiones del capítulo III	49
CONCLUSIONES GENERALES.....	50
RECOMENDACIONES.....	51
BIBLIOGRAFÍA	52
ANEXOS A: Parte de la programación realizada en matlab para determinar la incertidumbre.....	54

INTRODUCCIÓN

Desde el surgimiento de los instrumentos de medida, la misión fundamental de las mediciones ha sido proporcionar información que contribuyan al diagnóstico, pronóstico y seguimiento de las magnitudes. Esta información proviene de los resultados de la medición de magnitudes con interés.

Para conseguir este fin es necesario, además, contar con la información de una serie de elementos que permitan la correcta interpretación de los resultados, como pueden ser los valores de referencia, la descripción del procedimiento de medida utilizado o una información sobre la incertidumbre asociada a los resultados. Cuando los resultados de las mediciones se usan para la toma de decisiones es importante que junto a estos se informe de la incertidumbre con la que han sido obtenidos.

Hoy en día prácticamente todas las aplicaciones industriales son realizadas por motores eléctricos, ya que esta es la vía de accionar cualquier tipo de carga mecánica. Dentro del universo del motor eléctrico, el motor de inducción es el más común y abundante, ya que prácticamente todas las aplicaciones industriales pueden realizarse con este motor. El uso generalizado de los motores eléctricos le confiere vital importancia al estudio de su funcionamiento ya que consumen casi la mitad de la energía eléctrica generada. Dicho estudio se basa fundamentalmente en la evaluación o estimación de la eficiencia por medio de métodos que han sido desarrollados a lo largo del tiempo, los cuales para su aplicación parten de las mediciones ya que industrialmente, los motores son conectados a centros de control, donde existen los PTS y CTS instalados para propósitos de protección y/o mediciones.

En el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM) se cuenta con un pequeño sistema de bombeo de agua constituido por un motor asincrónico y una bomba centrífuga, el cual presenta frecuentes averías causando la interrupción en el servicio. Las causas de las fallas en el motor se desconocen debido a la falta de un sistema de medición. Esta problemática requiere de la existencia de un sistema de medición en el accionamiento de la bomba de agua del ISMMM que proporcione información que contribuya al diagnóstico, pronóstico y seguimiento de las fallas ocurridas en el motor. Sin embargo se desconoce si esta instrumentación proporciona mediciones fiables. Por lo que en la presente

investigación se realiza un estudio de la incertidumbre asociada a las mediciones recogidas con este equipamiento para así evaluarla y determinar la calidad metrológica de la instrumentación. Sobre la realidad planteada se establecen los elementos esenciales de la metodología de la investigación: Situación Problémica, problema, hipótesis y los objetivos.

Situación Problémica:

El sistema de bombeo de agua del ISMM presenta frecuentes averías, aunque este puede ser asistido con el nuevo equipamiento portátil de medición del Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa (CEETAM) para el diagnóstico, pronóstico y seguimiento de las fallas. No se puede asegurar que las mediciones obtenidas con dicho equipamiento son fiables.

Problema de investigación:

Se desconoce la fiabilidad de las mediciones obtenidas con el nuevo equipamiento portátil asistido por el CEETAM, empleado en el diagnóstico, pronóstico y seguimiento de las fallas ocurridas en el accionamiento del sistema de bombeo del ISMM.

Hipótesis:

Si se evalúa la incertidumbre asociada a los resultados de las mediciones obtenidas con el nuevo equipamiento portátil asistido por el CEETAM, entonces será posible evaluar tanto la fiabilidad de estos resultados como la calidad metrológica del equipamiento empleado para diagnóstico, pronóstico y seguimiento de las fallas ocurridas en el sistema de bombeo del ISMM.

Objetivo general:

Evaluar la incertidumbre asociada a los resultados de las mediciones obtenidas con el nuevo equipamiento portátil asistido por el CEETAM para el sistema de bombeo del ISMM.

Objetivos específicos:

1. Establecer las bases teóricas de:
 - Errores de las mediciones
 - Evaluación de la incertidumbre de las mediciones
 - Sistema de medición en motores de inducción.
2. Caracterizar la instrumentación utilizada en las mediciones del sistema de bombeo de agua del ISMM y cálculo de la incertidumbre de las mediciones realizadas.
3. Analizar los resultados de las mediciones

Objeto de estudio:

Accionamiento de la bomba de agua del ISMM.

Campo de acción:

Sistema de medición del accionamiento.

Aportes del trabajo:

Caracterización de la instrumentación utilizada en las mediciones del sistema de bombeo de agua del ISMM. Y evaluación de la fiabilidad de las mediciones obtenidas con la instrumentación utilizada.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

Introducción

La necesidad de medir es evidente en la mayoría de las actividades técnicas o científicas. Sin embargo, no interesa sólo contar con medidas sino también saber si dichas medidas son válidas. En este capítulo se realiza un análisis relacionado con la incertidumbre en las mediciones y a la teoría de errores como uno de los parámetros fundamentales en la evaluación de esta, así como en la determinación del método de medición empleado y que el instrumento haya sido utilizado correctamente. Por último, se hace referencia a la instrumentación utilizada en el análisis de motores eléctricos y sus esquemas de medición.

1.1. Error e incertidumbre de medida

Siempre que se realiza una medición aislada de una magnitud el resultado obtenido está afectado por el error de medida. El resultado aislado de una medición individual, x , es igual a:

$$x = \mu + e \quad (1.1)$$

donde μ es el valor verdadero del mensurando y (e) el error de medida. El valor verdadero de una magnitud es aquél perfectamente coherente con la definición de una magnitud específica particular [1]. Debido a que es imposible definir completamente el mensurando no existe un único valor verdadero sino un conjunto de valores verdaderos que se ajustan todos a esta incompleta definición del mensurando. De la ecuación anterior se obtiene se obtiene la siguiente:

$$e = x - \mu \quad (1.2)$$

es decir que el error de medida es igual al resultado de una medición menos el valor verdadero del mensurando [2].

Si en el cálculo del error se utiliza un valor convencionalmente verdadero lo que así se calcula es una estimación del error y por esto las modernas aproximaciones de la metrología no aconsejan el uso en la práctica del concepto de error en la descripción de la variabilidad de un resultado, aunque su uso siga teniendo validez en el campo de la

discusión teórica [3]. El error relativo es el error de medida dividido por el valor verdadero del mensurando [1].

El error de medida tiene dos componentes, el error sistemático (e_s) y el error aleatorio (e_a). Afectan a cualquier instrumento de medición y pueden deberse a distintas causas según que las variaciones que lo produzcan sean aleatorias o sistemáticas:

$$e = e_a + e_s \quad (1.3)$$

Las que se pueden de alguna manera prever, calcular, eliminar mediante calibraciones y compensaciones, se denominan determinísticos o sistemáticos y se relacionan con la exactitud de las mediciones. Los que no se pueden prever, pues dependen de causas desconocidas, o estocásticas se denominan aleatorios y están relacionados con la precisión del instrumento.

Atendiendo a su naturaleza los errores cometidos en una medición admiten una clasificación en dos grandes vertientes: errores aleatorios y errores sistemáticos.

- **Error aleatorio:** No se conocen las leyes o mecanismos que lo causan por su excesiva complejidad o por su pequeña influencia en el resultado final.

El error aleatorio es la diferencia entre el resultado de una medición y la media de un gran número de mediciones repetidas del mismo mensurando realizadas en unas condiciones de medida determinadas. En la práctica se asume que es suficiente que n , el número de mediciones, sea ≥ 20 [4].

El error aleatorio procede de las variaciones imprevisibles que se producen durante el proceso de medida. Como efecto de tales variaciones al efectuar mediciones repetidas de una magnitud en una misma muestra se obtienen resultados diferentes entre sí. La distribución de estos resultados, si sólo están afectados por errores aleatorios, sigue una distribución de Laplace-Gauss (distribución normal).

- **Error sistemático:** Permanecen constantes en valor absoluto y en el signo al medir, una magnitud en las mismas condiciones, y se conocen las leyes que lo causan.

El error sistemático, es la diferencia entre la media, \bar{x} , que se obtendría de un gran número de mediciones del mismo mensurando realizadas en condiciones de repetitividad y su valor verdadero [1]:

$$e_s = \bar{x} - \mu \quad (1.4)$$

En la práctica se asume que el número de mediciones sea $n \geq 20$ [4]. Si esta diferencia se divide por el valor verdadero se obtiene el error sistemático relativo. La imposibilidad de conocer el valor verdadero hace que el error sistemático de un procedimiento solamente pueda ser estimado.

Para determinar un error sistemático se deben de realizar una serie de medidas sobre una magnitud, se debe de calcular la media aritmética de estas medidas y después hallar la diferencia entre la media y dicha magnitud.

1.1.1. Causas de error en las mediciones

Siempre que se mide, nunca se puede descartar la presencia del error en el valor de las medidas. Aunque es imposible conocer todas las causas del error, es conveniente conocer las importantes y tener una idea que permita evaluar los errores más frecuentes [5]. Las principales causas que producen errores se pueden clasificar en:

- Error debido al instrumento de medida.
- Error debido al operador.
- Error debido a los factores ambientales.
- Error debido a las tolerancias geométricas de la propia pieza.

Los errores debidos al instrumento de medida están dado a que cualquiera que sea la precisión del diseño y fabricación de un instrumento presenta siempre imperfecciones. A estas, con el paso del tiempo, les tenemos que sumar las imperfecciones por desgaste, ejemplo a) error de alineación, b) error de diseño y fabricación y c) error por desgaste del instrumento. Debido a este tipo de errores se tienen que realizar verificaciones periódicas para comprobar si se mantiene dentro de ciertas especificaciones.

Los errores debidos al operador se deben a que el operador influye en los resultados de una medición por la imperfección de sus sentidos, así como por la habilidad que posee para efectuar las medidas. Las tendencias existentes para evitar estas causas de errores son la utilización de instrumentos de medida en los que elimina al máximo la intervención del operador.

- Error de mal posicionamiento, que ocurre cuando no se coloca la pieza adecuadamente alineada con el instrumento de medida o cuando con pequeños instrumentos manuales se miden piezas grandes en relación de tamaño. Otro ejemplo es cuando se coloca el aparato de medida con un cierto ángulo respecto a la dimensión real que se desea medir.
- Error de lectura y paralaje, cuando los instrumentos de medida no tienen lectura digital se obtiene la medida mediante la comparación de escalas a diferentes planos. Este hecho puede inducir a lecturas con errores de apreciación, interpolación, coincidencia, etc. Por otra parte, si la mirada del operador no está situada totalmente perpendicular al plano de escala aparecen errores de paralaje, como se muestra en la (figura 1.1.).

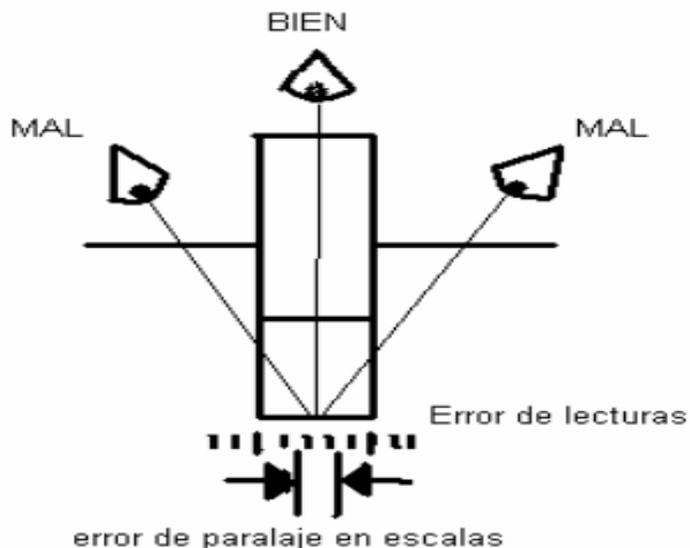


Fig 1.1. Error de paralaje

- Error de precisión.- Este sucede cuando el aparato o instrumento carece en su construcción, de algún elemento que neutralice o regule un exceso de esfuerzo utilizado en el manejo del aparato. En la medición propiamente dicha no debe olvidarse que si la acción se efectúa con mayor o menor esfuerzo, se producirá una medición de lectura de valor distinto que dependerá del grado de esfuerzo utilizado debido a aplanamientos de las superficies de contacto de dicho instrumento. También se tiene el caso, cuando se utilizan calibres que al sujetarlo manualmente con una fuerza mayor a la necesaria, la sensibilidad disminuye.

Dentro de los errores debidos a los factores ambientales el más destacado y estudiado es el efecto de la temperatura en los metales dado que su influencia es muy fuerte.

- Error por variación de temperatura, donde los objetos metálicos se dilatan cuando aumenta la temperatura y se contraen al enfriarse.
- Otros agentes exteriores. Influyen mínimamente como humedad, presión atmosférica, polvo y suciedad en general. También de origen mecánico, como las vibraciones del mundo. Al igual de la tierra.

En errores debidos a las tolerancias geométricas de la propia pieza las superficies geométricas reales de una pieza implicada en la medición de una cota deben presentar unas variaciones aceptables [6].

- Errores de deformación. La pieza puede estar sometida a fuerzas en el momento de la medición por debajo del límite elástico tomando cierta deformación que desaparece cuando cesa la fuerza.
- Errores de forma. Se puede estar midiendo un cilindro cuya forma aparentemente circular en su sección presente cierta forma oval.
- Errores de estabilización o envejecimiento. Estas deformaciones provienen del cambio en la estructura interna del material. El temple de aceros, es decir, su enfriamiento rápido, permite que la fase austenítica se transforme a fase martensítica, estable a temperatura ambiente. Estos cambios de geometría son muy poco conocidos, pero igualmente tienen un impacto importante.

1.1.2. Definición de la incertidumbre

Los organismos internacionales de normalización recomiendan que todo resultado de una medición debe ir acompañado de alguna indicación cuantitativa que informe de la calidad metrológica con que se ha obtenido y que permita evaluar la fiabilidad de este resultado ya que de hecho sin esta información los resultados de las mediciones no estarán completos [7]. Esta información cuantitativa sobre un resultado de una medición es la incertidumbre de medida de dicho resultado.

El término incertidumbre utilizado en el lenguaje común [8] significa falta de conocimiento seguro y claro de algo, mientras que en el campo de la metrología incertidumbre de medida significa duda acerca de la validez del resultado de una medición, así como duda sobre la exactitud del resultado. La incertidumbre, según la definición del Vocabulario Internacional de términos básicos y generales en metrología [1], es un parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que razonablemente pueden atribuirse a una magnitud particular. Esta dispersión no tiene por qué ser una distribución observada de valores. El parámetro estadístico que caracteriza esta dispersión puede ser la desviación típica, un múltiplo de ella o la amplitud de un intervalo de confianza.

Cuando se expresa como desviación típica la incertidumbre se denomina incertidumbre típica y se simboliza como u [9]. Cuando la incertidumbre típica se divide por el resultado de la medición se denomina incertidumbre típica relativa, que se simbolizada como u_{rel} [9] y se expresa como un coeficiente de variación.

La incertidumbre total de un resultado de una medición, denominada incertidumbre típica combinada u_c , es una desviación típica estimada igual a la raíz cuadrada positiva de la variancia total obtenida sumando todos los componentes de variancias y covariancias, independientemente de la forma en que se hayan evaluado, usando la ley de propagación de la incertidumbre [9].

1.1.3. Evaluación de la incertidumbre

La Guía para la expresión de la incertidumbre en las mediciones [9] establece que el procedimiento para la evaluar la incertidumbre de los resultados de medida consiste fundamentalmente en cuatro puntos:

1. Especificación de la magnitud. - Se debe definir y escribir claramente cuál es la magnitud objeto de medición.
2. Identificación de los componentes de incertidumbre. - Se debe identificar en cada magnitud aquellas magnitudes y parámetros de los que depende y sus incertidumbres asociadas o bien en los casos en que esto no sea posible cada una de las partes en que se ha dividido el procedimiento de medida y su incertidumbre asociada.
3. Cuantificación de los componentes de incertidumbre. - Medir o estimar el valor de la incertidumbre asociada a cada uno de los componentes de incertidumbre identificados.
4. Cálculo de la incertidumbre total. - A partir de los valores de los diversos componentes individuales de incertidumbre estimados se calcula la incertidumbre típica combinada de acuerdo con reglas apropiadas y mediante la aplicación de un factor de cobertura determinado se obtiene la incertidumbre combinada expandida.

El concepto de incertidumbre de medida sólo es aplicable a resultados de medida sin error sistemático o a resultados de medida corregidos [9]. En principio los efectos reconocidos de error sistemático deberían ser corregidos en el resultado final de una medición y no se tendrán en cuenta en la evaluación de la incertidumbre asociada al resultado de una medición.

1.1.4. Especificación de la magnitud

El primer paso en la evaluación de la incertidumbre es especificar claramente que magnitud se está midiendo y cuál es el procedimiento utilizado para su medición. El objetivo de toda medición es obtener el valor de un mensurando, es decir el valor de una magnitud particular que es objeto de medición.

El resultado de una medición depende de que se está midiendo y de cómo se mide, de manera que toda estimación de la incertidumbre debe comenzar con una adecuada definición del mensurando y del procedimiento de medida.

Por tanto, el primer paso es especificar cuál es el mensurando. El mensurando no puede ser especificado por un valor sino solamente mediante la descripción de la magnitud. Es necesario tener en cuenta que, excepto las constantes fundamentales de la naturaleza como la carga de un electrón, un mensurando no puede ser descrito completamente sino con una cantidad infinita de información y generalmente no se puede tener en cuenta todos los detalles que conforman el sistema, el componente y el tipo de magnitud. De esta manera a la hora de interpretar el resultado de una medición se debe valorar que lo que se mide realmente puede que no coincida necesariamente con la definición de la magnitud y que las mediciones corresponden en realidad a una magnitud que únicamente se aproxima a la definición del mensurando. Una incompleta definición de una magnitud puede en determinados casos aumentar la incertidumbre de tal manera que sea necesario incluir su análisis a la hora de evaluar la incertidumbre asociada a un resultado.

El objetivo principal de este paso es definir cuál es la expresión que relaciona la magnitud que se está midiendo con aquellas magnitudes de las que depende [9]. Se debe por tanto establecer claramente, siempre que sea posible, las relaciones entre el mensurando final y estas otras magnitudes. Así mismo, el resultado de una medición puede estar influenciado por magnitudes que no deberían ser medidas por el procedimiento de medida, son las denominadas magnitudes influyentes, y que se deben tener en cuenta. La experiencia del evaluador y la información que se encuentra a su disposición es fundamental para conocer cuáles de estas magnitudes influyentes son importantes en cada caso y para decidir si es necesario incluir o no su estudio en la evaluación de la incertidumbre.

De esta manera, el punto de partida de un proceso de evaluación de la incertidumbre es la expresión de la función que relacione estas magnitudes intermedias con la magnitud que se está midiendo. Esta función, f , puede adoptar una forma general del siguiente tipo:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

donde y es la magnitud objeto de medición y $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ las distintas magnitudes intermedias de las que depende. A su vez estas magnitudes intermedias pueden depender de otras, de manera que estas mismas pueden ser también expresadas por una función de este tipo. Las relaciones entre estas magnitudes intermedias y la magnitud final, ya sean simples o complejas, son definidas por la función mencionada.

La utilización explícita de una función para expresar esta relación es sobre todo útil para la discusión teórica, pero en la práctica, como puede ser en un proceso de estimación de la incertidumbre, su uso no es frecuente debido a la dificultad que suele entrañar su enunciado. A la hora de especificar una magnitud es más habitual dividir el procedimiento de medida en una serie de partes que forman parte del mismo y que van a facilitar la evaluación de la incertidumbre. Por otro lado, el hecho de que frecuentemente sea posible evaluar el efecto combinado de diversos componentes de la incertidumbre hace que se pueda reducir el esfuerzo realizado para estimar la incertidumbre y en general no es necesario estimar la incertidumbre típica de cada una de las magnitudes físicas medidas. De esta manera, generalmente, para estimar la incertidumbre asociada al resultado de una medición, suele ser suficiente con el conocimiento de la incertidumbre típica de unos pocos componentes de la incertidumbre. Además, esta división en bloques del procedimiento puede facilitar, en algunos casos, la adecuada combinación de los diversos componentes de la incertidumbre estimados.

Cualquier medición reposa en uno o varios principios de medida que son la base científica de una medición. El método de medida [1] es la secuencia lógica de operaciones, descrita de forma genérica, usada para realizar las mediciones mientras que el procedimiento de medida [1] es el conjunto de operaciones descrito de forma concreta usado para realizar las mediciones particulares según un método particular.

Cuando se especifica una magnitud se deberían indicar también las correcciones realizadas de todos los errores sistemáticos y definir adecuadamente cual es el procedimiento para el cual se desea estimar la incertidumbre, indicando claramente cuáles son las operaciones de que consta dicho procedimiento de manera que no es lo mismo la estimación de la incertidumbre cuando se usa un procedimiento que incluye los procesos de la toma de la muestra de uno que no incluya estos procesos.

Identificación de las fuentes de incertidumbre

El siguiente paso es la identificación de todas las posibles fuentes de incertidumbre. En principio el listado puede incluir los componentes de la incertidumbre de las distintas magnitudes intermedias que aparecen en la función especificada anteriormente [1], pero también puede recoger ciertos componentes de la incertidumbre que no aparecen

reflejados en esta ecuación como son aquellos que son el resultado de dividir el procedimiento en una serie de apartados que faciliten la evaluación de la incertidumbre. En esta parte del proceso de estimación de la incertidumbre no es importante la cuantificación de los componentes individuales identificados, sino que el objetivo es clarificar que componentes deben ser considerados; en el apartado siguiente se aborda la mejor manera de tratar cada componente de la incertidumbre.

Cuantificación de la incertidumbre

El siguiente paso es la cuantificación de los componentes de la incertidumbre identificados. En este punto es importante identificar aquellos componentes que tendrán una contribución significativa a la incertidumbre combinada ya que, generalmente, en la práctica sólo un número muy pequeño de ellos lo tienen y a menos que haya un gran número de componentes significativos, aquellos cuya contribución es más pequeña no necesitan ser evaluados en detalle. Es interesante revisar la lista establecida en el apartado anterior para simplificarla e identificar grupos de componentes de incertidumbre que puedan ser evaluados como un único componente de incertidumbre y que además permitan facilitar la combinación de la incertidumbre de estos componentes. La experiencia del evaluador es fundamental para hacer una selección de cuáles son los componentes de la incertidumbre más relevantes en cada caso [10].

En general la incertidumbre de los resultados obtenidos tiene como componentes más importantes el producido durante la fase pre metrológica, el producido por la imprecisión del procedimiento y el producido por el efecto que ejercen las magnitudes influyentes sobre el mensurando.

La *Guía para la expresión de la incertidumbre en las mediciones* [9] establece dos formas de evaluación de la incertidumbre típica de los resultados de medida de acuerdo con la manera en que es estimado su valor numérico:

Evaluación de tipo A: es aquella en que la incertidumbre típica es estimada mediante el análisis estadístico de series de observaciones [9].

Evaluación de tipo *B*: es aquella en que la incertidumbre típica es estimada por otros métodos distintos al análisis estadístico de series de observaciones [9].

El propósito de esta clasificación es únicamente indicar la existencia de dos tipos de evaluaciones de la incertidumbre y no existe ninguna diferencia en la naturaleza de los componentes resultantes en los dos tipos. Ambos están basados en distribuciones de probabilidad y los componentes de incertidumbre resultantes de cada tipo de evaluación están cuantificados mediante una desviación típica o variancia, pero mientras que los estadísticos estimados que caracterizan los componentes de incertidumbre en las evaluaciones de tipo *A* son calculados a partir de series repetidas de observaciones, en las evaluaciones de tipo *B* los componentes de incertidumbre son unas variancias estimadas mediante la evaluación de los conocimientos que se disponen sobre el procedimiento y la magnitud.

1.1.5. Cálculo de la incertidumbre combinada

El siguiente paso es combinar la incertidumbre típica estimada de los distintos componentes de incertidumbre que afectan a un resultado para estimar la incertidumbre combinada del mismo.

Los resultados de las mediciones realizadas tienen diversas causas de incertidumbre o bien han podido ser calculados a partir de los valores de diversas magnitudes intermedias cada una con su incertidumbre. En este trabajo se denomina componente de incertidumbre a cada una de las contribuciones a la incertidumbre de un resultado ya esté este componente asociado a una parte del procedimiento o corresponda a la incertidumbre de otras magnitudes a partir de los cuales se ha obtenido dicho resultado.

La incertidumbre típica combinada es la incertidumbre típica de un resultado de una medición cuando este resultado se ha obtenido a partir de los valores de otras magnitudes o cuando sobre este resultado actúan diversas causas de incertidumbre. La relación general que se establece entre la incertidumbre combinada de un resultado y las incertidumbres de los diversos componentes individuales de incertidumbre que lo afectan depende de la función f , que define la magnitud objeto de medición, que relaciona la magnitud que se está midiendo con las distintas magnitudes de las que depende, y es expresada por la siguiente ecuación [9]:

$$u_c = u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (1.5)$$

en donde $u(y)$ es la incertidumbre típica combinada del resultado de la medición y $u(x_i)$ la incertidumbre típica de cada una de las magnitudes intermedias de las que depende el resultado o de los distintos componentes que afectan a la incertidumbre del procedimiento. Por tanto, $u(y)$ es la raíz cuadrada del sumatorio del cuadrado de la incertidumbre típica asociada a cada componente individual de incertidumbre multiplicada por el cuadrado de la derivada parcial del modelo de función con respecto a dicha magnitud intermedia. Esta derivada parcial se denomina también coeficiente de sensibilidad. En el caso de que dos magnitudes intermedias, x_i y x_j no sean independientes y estén correlacionadas, la covariancia entre ellas se debería introducir en la fórmula anterior de manera que la fórmula quedaría como sigue [9]:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (1.6)$$

Desarrollando esta expresión se tiene que:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (1.7)$$

Sustituyendo el valor del coeficiente de correlación

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i) u(x_j)} \quad (1.8)$$

Entonces

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \quad (1.9)$$

El efecto de la covariancia entre varias magnitudes puede incrementar o disminuir la incertidumbre típica combinada.

Cuando la incertidumbre típica combinada se divide por el resultado de la medición se denomina incertidumbre típica combinada relativa y se simboliza como (u_{rel}) [9].

Si bien estas son las expresiones de la incertidumbre típica combinada general, y la que se usa cuando existen magnitudes correlacionadas, en la práctica en la mayoría de los casos estas expresiones se pueden reducir a formas mucho más simples siguiendo dos simples reglas:

1. Para magnitudes, y , en las que la función de relación con las magnitudes de las que depende (x_1, x_2, \dots, x_n) sólo incluye sumas o diferencias como $y = x_1 + x_2 + \dots + x_n$ la incertidumbre típica combinada se propaga según una ecuación del siguiente tipo:

$$u_c = u(y) = \sqrt{u^2(x_1) + u^2(x_2) + \dots + u^2(x_N)} \quad (1.10)$$

es decir, la incertidumbre combinada es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las incertidumbres típicas de los distintos componentes.

2. Para magnitudes, y , en las que la función de relación con las magnitudes de las que depende (x_1, x_2, \dots, x_n), sólo incluye multiplicaciones y divisiones como $y = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n$ la incertidumbre combinada, expresada en forma de incertidumbre combinada relativa, se propaga según una ecuación del siguiente tipo:

$$u_{c,rel} = u(y) = \sqrt{\left(\frac{u(x_1)}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{u(x_2)}{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{u(x_N)}{x_N}\right)^2} \quad (1.11)$$

es decir que la incertidumbre combinada relativa sería la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las incertidumbres típicas relativas de los distintos componentes.

En estos casos, en los que aparecen únicamente operadores matemáticos simples, la incertidumbre combinada puede ser calculada fácilmente una vez que ha sido calculada la incertidumbre de los distintos componentes. Por tanto, la estimación de la incertidumbre típica combinada se puede simplificar en aquellos procedimientos en los que sus diversos componentes de incertidumbre tengan una relación de este tipo.

En caso de funciones más complicadas puede ser conveniente para facilitar el tratamiento de los datos la utilización de programas informáticos con hojas de cálculo útiles para este fin [11].

En determinados campos de aplicación se puede usar la incertidumbre expandida, simbolizada como U , para informar la incertidumbre. La incertidumbre expandida es aquella magnitud que define un intervalo alrededor del resultado de medida que se puede esperar que contenga una gran fracción de la distribución de valores que razonablemente pueden atribuirse al mensurando [9]. La incertidumbre expandida se obtiene al multiplicar la incertidumbre típica, o la incertidumbre típica combinada por un factor de cobertura k :

$$U = k u \quad (1.12)$$

El factor de cobertura es un factor numérico usado como multiplicador de la incertidumbre típica para obtener la incertidumbre expandida [9]. El resultado de una medición puede ser entonces expresado como $Y = y \pm U$, que es interpretado como que la mejor estimación del valor atribuible al mensurando Y es y , y que el intervalo $[y - U; y + U]$ contiene con un alto grado de confianza p los valores que pueden ser razonablemente atribuidos a Y . Tal intervalo de confianza puede ser también expresado como $y - U < Y < y + U$.

A la hora de la elección del factor de multiplicación hay que tener en cuenta una serie de aspectos:

- El grado de confianza deseado.
- Cualquier conocimiento de las distribuciones de los datos subyacentes.
- Cualquier conocimiento del número de valores usados para estimar los efectos aleatorios. Las muestras pequeñas pueden llevar a estimaciones optimistas de la incertidumbre expandida.

El valor del factor de multiplicación k es elegido en función del grado de confianza que se desea asociar al intervalo $y \pm U$. Cuando la distribución de los datos que se manejan es normal el factor de cobertura se puede relacionar con el nivel de confianza de la siguiente manera: si $1 - \alpha = 0,95$, es decir si el intervalo contiene aproximadamente un 95% de la distribución de valores el factor de cobertura es 2, si $1 - \alpha = 0,99$ el factor de cobertura es 2,6 y si $1 - \alpha = 0,996$ el factor de cobertura es 3,0. En general k está dentro del intervalo comprendido entre 2 y 3, y para la mayoría de los propósitos se recomienda que k sea 2, sin embargo este factor puede ser establecido de una manera especial en determinadas ocasiones, por ejemplo cuando ha sido usado un número pequeño de mediciones para estimar grandes efectos aleatorios.

Expresión numérica de los resultados

Los valores numéricos de los resultados y su incertidumbre no deberían de ser expresados con un número excesivo de dígitos. La incertidumbre se debería relacionar con el valor numérico con el que se expresa el resultado. El resultado de una medición se debería redondear con el fin de que solamente contuviera los dígitos conocidos con seguridad más el primero de los que están afectados por la incertidumbre. Durante todo el proceso de estimación en todos los cálculos se ha de mantener un número de decimales superior al utilizado habitualmente para cada magnitud biológica.

1.2. Instrumentos utilizados para el análisis de motores y sus esquemas de mediciones

El estudio del funcionamiento de las máquinas eléctricas depende de las herramientas con que se cuentan para llevarlo a cabo, estudios recientes indican que el 90 % de los fallos en máquinas ocurren a raíz del funcionamiento anormal de los componentes internos [12]. Las actuales exigencias de calidad consideran cada vez más necesaria la utilización de sistemas de monitoreo y detención de fallas, de modo de no interrumpir la producción; estas herramientas son los instrumentos de medida, de ahí radica la importancia que tiene su estudio, conocer cuáles son estos, cual es el instrumento indicado para llevar a cabo un determinado proceso de medición, así como las características y los diversos usos que se le pueden dar, por lo que requieren de un seguimiento [13].

1.2.1. Análisis de la temperatura

Para llevar a cabo el análisis de temperatura en los motores eléctricos, es esencial la técnica de la termografía infrarroja [13], una herramienta de diagnóstico fundamental, esta nos brinda el conocimiento de una serie de aspectos mediante los cuales podemos realizar un estudio detallado para determinar el estado de un motor, si existen fallas, o la existencia de otras anomalías [14]; el proceso se realiza a través de dos instrumentos, la cámara infrarroja, y el termómetro infrarrojo o pirómetro, los cuales tienen sus características y modos de uso.

Cámara termográfica

Una cámara termográfica se utiliza como una herramienta de diagnóstico en diferentes sectores como la industria energética, la arquitectura, la ingeniería y la medicina; es el dispositivo que mide el patrón térmico del cuerpo al que se apunta en el espectro de la longitud de onda infrarroja y sin entrar en contacto con ese cuerpo. Registra la radiación del objeto y la convierte en una imagen visible por el ojo humano (ver Fig. 1.1). Tiene una variedad de funciones entre las que se destacan la detección de humedades, fugas, condiciones de aislamiento y de cómo circula la energía, además son muy útiles para solucionar problemas de motores, así como para supervisar el estado del equipo y realizar tareas de mantenimiento preventivo a largo plazo.



Fig. 1.1 Esquema de medición de la cámara termográfica

Pirómetro infrarrojo

Facilita la medición de temperatura a distancia sin contacto con el objeto a medir[15]. Como tal, el termómetro infrarrojo es útil para medir la temperatura en circunstancias en las que los termopares u otros sensores de tipo de sonda no se pueden usar o no producen datos precisos por diversas razones. Algunas circunstancias típicas son cuando

el objeto a medir está en movimiento; cuando el objeto está rodeado de un campo electromagnético, como en calentamiento por inducción; cuando el objeto está contenido en un vacío u otra atmósfera controlada; o en aplicaciones en las que se requiere una respuesta rápida, a diferencia de la cámara termográfica solo pueden captar temperaturas en un punto como se muestra en la (Figura 1.2).



Fig. 1.2. Esquema de medición del Pirómetro infrarrojo

1.2.2. Análisis de la resistencia de aislamiento

El Megger deja pasar una cantidad específica de voltaje a través del dispositivo que se está probando y mide la resistencia que este voltaje encuentra. Su uso es muy simple y la lectura da directamente el valor de la resistencia sin cálculo alguno. El valor de la resistencia se indica en la escala del Megger. La indicación de la escala debe multiplicarse por el factor de ajuste correcto ya sea en gigas (1×10^9), por megas (1×10^6), etc.

Las medidas de continuidad y resistencia de aislamiento se utilizan para comprobar el buen estado del motor y se realizan con este desconectado de la instalación. Para comprobar la continuidad de los bobinados, se utiliza el instrumento, midiendo el valor de la resistencia de cada fase y se comparan los resultados, ya que estos han de ser idénticos. De no ser así, el motor presenta algún defecto.

Las medidas de resistencia de aislamiento son cuantitativas, se toma una medición en un periodo de 1 minuto y una medición del índice de polarización (IP) de 10 minutos, donde IP es la relación $10\text{min}/R_{1\text{min}}$ que es independiente de la temperatura, se realizan con el Megger con el cual se comprueba la resistencia de aislamiento entre las fases de motor,

así como entre cada fase y la carcasa metálica. La conexión se realiza como se aprecia en el esquema de la (Fig. 1.3).

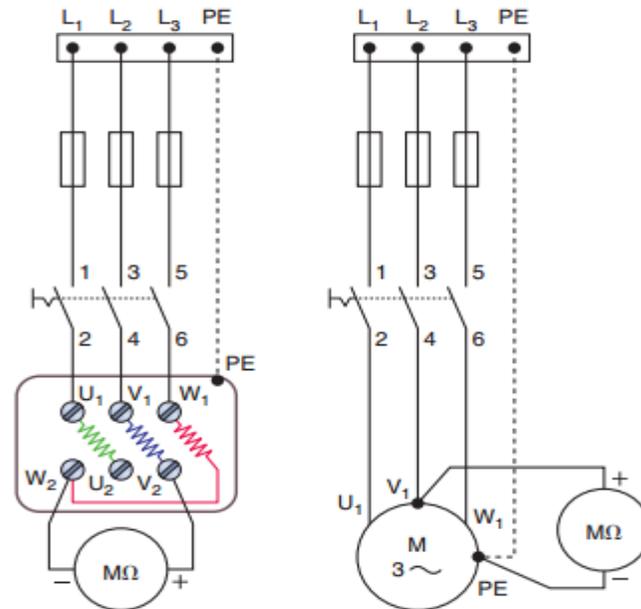


Fig. 1.3. Esquema de conexionado para la medida de la resistencia de aislamiento del motor

Índice de polarización (PI)

Otro de los muestreos que se pueden realizar con el Megger es el índice de polarización, en esta aplicación de las mediciones basadas sobre la influencia del tiempo de aplicación de la tensión de ensayo, se efectúan dos lecturas a 1 y a 10 minutos respectivamente. La ratio sin dimensión de la resistencia de aislamiento a 10 minutos sobre la de un 1 minuto se llama Índice de Polarización (PI) y permite definir la calidad del aislamiento.

La recomendación IEEE 43-2000

"Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery" define el valor mínimo del índice de polarización PI para máquinas rotativas AC y DC de clase de temperatura B, F y H en 2,0. De forma general, un índice PI superior a 4 es señal de un aislamiento excelente mientras que un índice inferior a 2 indica un problema potencial.

Cabe destacar que el método de medida mediante lectura del índice de polarización es apropiado para el control de los circuitos aislantes sólidos; por consiguiente, no se recomienda para equipos de tipo transformadores de aceite para los que daría resultados débiles incluso en situaciones de buenas condiciones de aislamiento.

$$PI = R \text{ aislamiento a 10 minutos} / R \text{ aislamiento a 1 minuto}$$

1.2.3. Empleo de los analizadores de redes eléctricas

Estos equipos son analizadores de elevadas prestaciones. Diseñados para ser instalados de forma muy sencilla en cualquier instalación y para que su uso sea totalmente adaptable a cualquier tipo de medida requerida. . Disponen de una memoria interna donde se guardan todos los parámetros deseados, totalmente programables. Además, un mismo analizador puede contener varios *software*, cuyas aplicaciones vayan destinadas a distintos tipos de análisis. Existe una gran variedad de analizadores los cuales exportan o muestran los parámetros eléctricos directa o indirectamente a través de display y transmiten por comunicaciones todas las magnitudes eléctricas medidas y/o calculadas. Algunos analizadores son expandibles o modulares, pudiendo dotarlos de funciones adicionales asociables a cualquier parámetro eléctrico medido o calculado. Tienen funciones de análisis avanzado que permiten una medida efectiva de los principales parámetros eléctricos en redes trifásicas o monofásicas: La distorsión armónica total o THD (Total Harmonic Distorsión), nos indican el ángulo de fase de los diferentes armónicos, factor de potencia por fases, corriente por fase: I1, I2, I3 y calcula la corriente trifásica, tensión entre fases: V1-2, V1-3, V2-3 y calcula la tensión trifásica, factor de potencia trifásico, aportación de armónicas en corriente y tensión, potencia eléctrica activa total o trifásica (KW totales), potencia eléctrica reactiva total o trifásica (KVAR), potencia eléctrica aparente total o trifásica (KVA). Están los analizadores fijos, son aquellos equipos cuya característica es que son instalados en la parte frontal de los gabinetes o tableros eléctricos, permitiendo una visibilidad directa, y los analizadores portátiles trifásicos (Miden todos los principales parámetros eléctricos de una red eléctrica en verdadero valor eficaz con 4 canales de tensión y 4 de corriente con autotriggger configurable según las magnitudes que se deseen). A pesar de que existen variedades de estos, con diferentes estructuras, tamaños como se muestra en la (fig. 1.4), el principio de medición es el mismo, unos con más funciones integradas que otros por el desarrollo de la tecnología. A continuación se muestran una serie de conexiones de analizadores de montajes fijos y portátiles.



Fig. 1.4. Analizadores de redes eléctricas

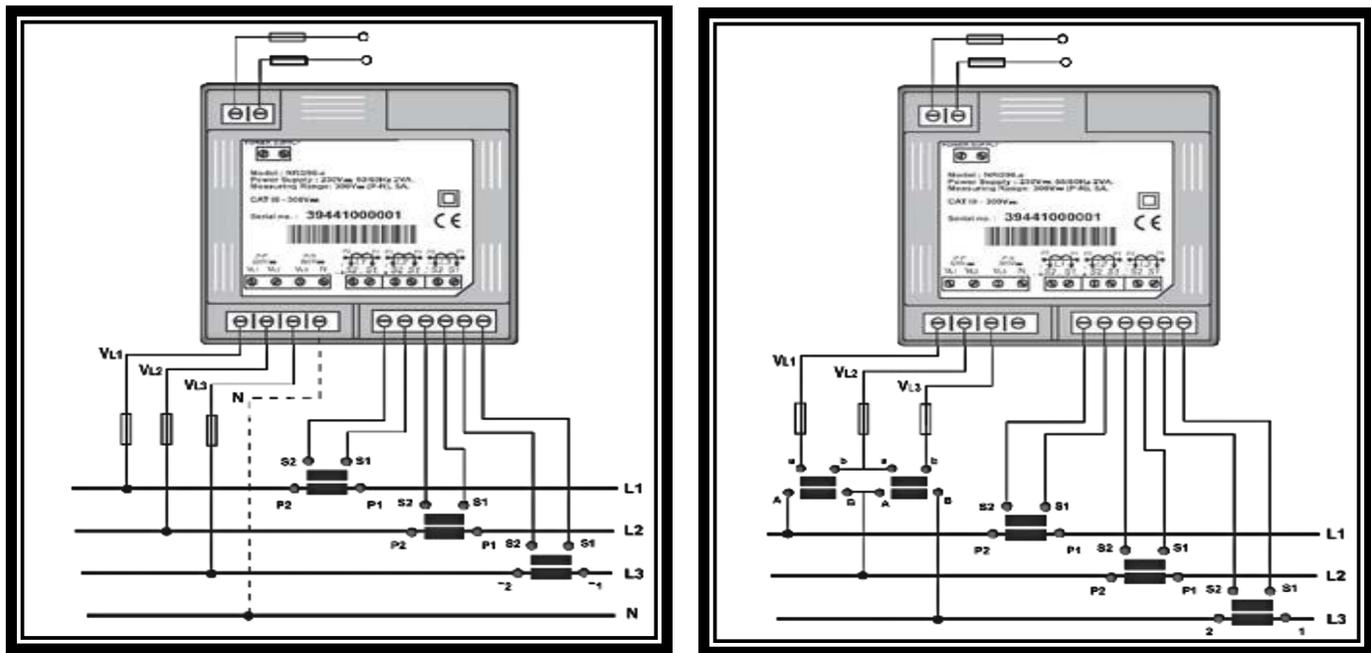


Fig. 1.5. Conexiones de los analizadores fijos, montados en los tableros eléctricos, de 3 ó 4 hilos (baja tensión) y 3 hilos con 2 transformadores de tensión y 3 de corriente

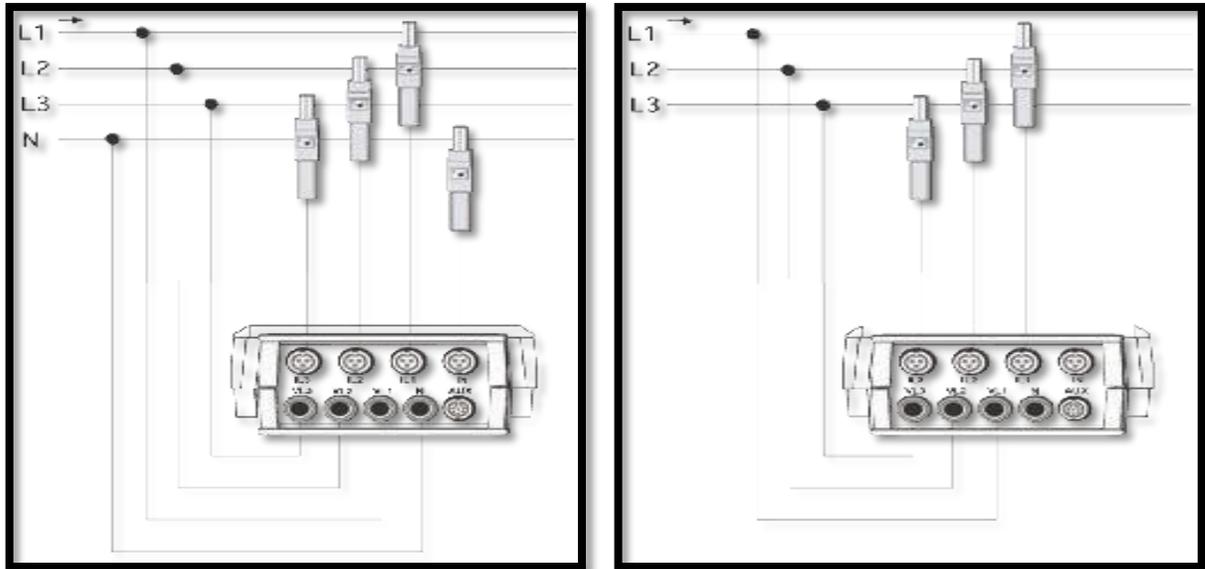


Fig. 1.6. Conexiones de los analizadores de redes portátiles, (sistema trifásico de 4 hilos y 3 hilos)

1.2.4. El Multímetro Digital

Forma parte de los instrumentos utilizados para el diagnóstico de motores, a veces también denominado polímetro, en un instrumento electrónico de medida que combina varias funciones en una sola magnitud, las funciones más comunes integradas en un multímetro son las de voltímetro, amperímetro y óhmetro. Con él se pueden desarrollar una serie de mediciones básicas Como son: Medición de voltaje, corriente, resistencia, prueba de continuidad, y mediciones más avanzadas como temperatura, frecuencia, capacitancia y medición de transistores, aunque dependiendo del modelo y la marca pueden variar en cuanto a todas estas funciones.



Fig. 1.7. Multímetro digital.

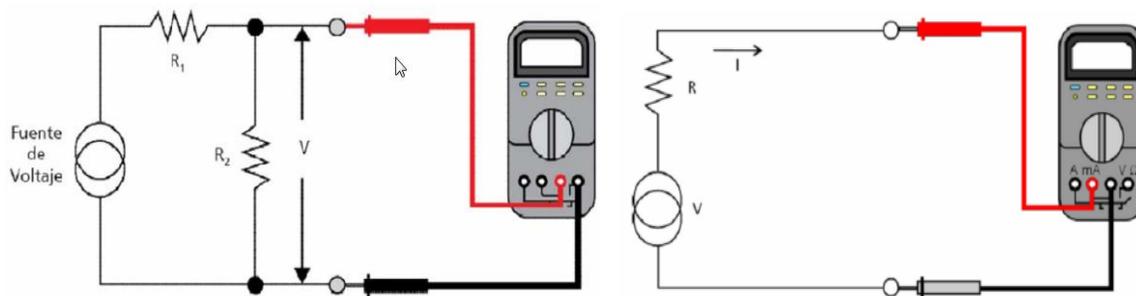


Fig. 1.8. Esquemas de conexión para la medición de voltaje y corriente

1.2.5. Tacómetro digital

El tacómetro es un dispositivo que mide las revoluciones por minuto (RPM) del rotor de un motor o una turbina, velocidad de superficies y extensiones lineales. Son utilizados para llevar un registro de las velocidades del elemento que tengamos en estudio, que nos permita saber si está trabajando de forma adecuada. Con este tipo de instrumentos evitaríamos que se detenga la maquinaria, pudiendo hacer un mantenimiento en el momento adecuado. Existen dos tipos de tacómetros muy utilizados: el tacómetro óptico y el tacómetro de contacto.

El tacómetro óptico mide con precisión la velocidad rotatoria (RPM) usando un haz de luz visible, puede ser usado a una distancia de hasta 8 m en un elemento rotatorio. La construcción robusta, portabilidad y características notables del tacómetro óptico, lo hacen la opción ideal para el departamento de mantenimiento, operadores de máquinas y varias otras aplicaciones en maquinarias.



Fig. 1.9. Esquema de medición del tacómetro óptico

El tacómetro de contacto mide con precisión la velocidad rotatoria y de superficies, así como longitud. El interruptor incorporado del selector permite que el usuario exhiba lecturas en una amplia variedad de unidades de medidas. La medición con contacto se lleva a cabo por medio de un adaptador mecánico con cabeza o con rueda de medición.

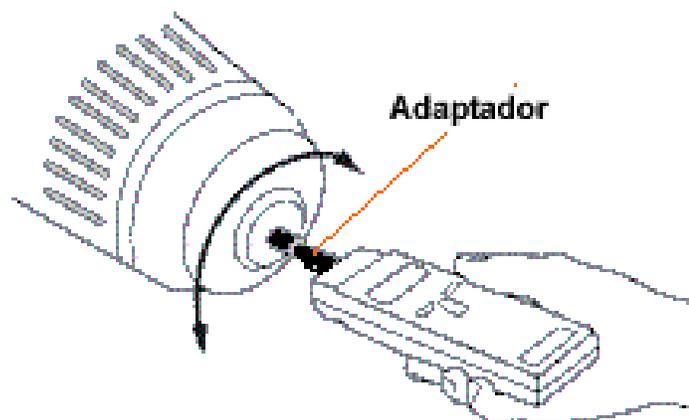


Fig. 1.10. Esquema de medición del tacómetro de contacto

1.3. Conclusiones del capítulo I

En este capítulo se han abordado los criterios y conceptos básicos para el desarrollo de la investigación, donde se recogen los fundamentos teóricos necesarios que sirven de base a los posteriores capítulos. Se abordaron las teorías generales de los aspectos relacionados con la evaluación de la incertidumbre, errores de las mediciones y los sistemas de medición de las máquinas rotatorias, así como los instrumentos que se utilizan para medir las diferentes magnitudes eléctricas en el análisis de los motores. El conocimiento de todos estos parámetros constituye la herramienta fundamental para determinar la incertidumbre en las magnitudes registradas en los procesos de medición, y evaluar la calidad metrológica de la instrumentación.

CAPÍTULO II. EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL SISTEMA DE MEDICIÓN EMPLEADO EN EL MOTOR QUE ACCIONA LA BOMBA DE AGUA DEL ISMMM

Introducción

El conocimiento de todos los factores que pueden causar variación en un resultado es necesario para la estimación de la incertidumbre y fundamental para la correcta interpretación del mismo. Este capítulo enfoca su atención en la caracterización de la instrumentación utilizada en el sistema de mediciones, y el procedimiento de cálculo de la incertidumbre en la evaluación de la eficiencia del motor de inducción por el método del circuito equivalente; el Algoritmo mostrado sería diferente para otros métodos de evaluación de la eficiencia.

2.1. Caracterización de la instrumentación utilizada

En el sistema de bombeo de agua del ISMM se realizaron diferentes mediciones con equipamientos portátiles de medición, que fueron colaborados por el CETAM. Este equipamiento consta de un analizador de redes, pirómetro y un Megger. Toda la instrumentación fue destinada al estudio del comportamiento energético del motor. Los métodos empleados en la medición de las diferentes magnitudes que caracterizaron el funcionamiento del motor fueron directos e indirectos.

2.1.1. Medición de Aislamiento (Megger)

Las mediciones fueron tomadas en específico con el Meghometro medidor de aislación UNI- T UT502A que se muestra en la (Fig. 2.1), el cual posee una pantalla LCD iluminada de 71 x 34 mm de 2000 cuentas, luz de fondo de pantalla, función HOLD (retención de lectura), función de apagado automático, indicación del estado de la batería, coeficiente de absorción dieléctrica (DAR) 60s/15s y 60s/30s, un botón de chequeo de batería, además destinado para medir la resistencia del aislamiento en el diapasón de 0 MΩ a 20.0GΩ con voltajes 500 V / 1000 V / 2500 V. Las especificaciones técnicas se muestran en la (tabla 2.1.)

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas de Megger

Función	Diapasón		Precisión
Resistencia de aislamiento (Ω)	Diapasón de voltaje	500 V / 1000 V / 2500 V	0%~10%
	500 V	0.00 M Ω ~99.9 M Ω	$\pm(3\%+5)$
		100 M Ω ~5.5 G Ω	$\pm(5\%+5)$
	1000 V	0.00 M Ω ~99.9 M Ω	$\pm(3\%+5)$
		100 M Ω ~5.5 G Ω	$\pm(5\%+5)$
	2500 V	0.00 M Ω ~99.9 M Ω	$\pm(3\%+5)$
		100 M Ω ~9.9 G Ω	$\pm(5\%+5)$
		10.0 G Ω ~20.0 G Ω	$\pm(10\%+5)$
Corriente de carga	500 V (R = 500 K Ω) 1 mA	0%~10%	
	1000 V (R = 1 M Ω) 1 mA	0%~10%	
	2500 V (R = 2.5 M Ω) 1 mA	0%~10%	
Corriente de cortocircuito		<2mA	
Continuidad (Ω)	Diapasón de voltaje	about 5.0 V	$\pm(2\%+3)$
		0.01 Ω ~ 200 Ω	
	Corriente máxima	>200 mA	
Voltaje AC(V)	30 V ~ 750 V		$\pm(2\%+3)$
Datos generales			
Alimentación	Pilas alcalinas de 1.5 V (LR6) \times 6		
Tamaño de pantalla LCD	70.6mm \times 34mm		
Peso neto del producto	500 g		
Dimensiones	150 mm \times 100 mm \times 71 mm		



Fig. 2.1. Megger UNIT- T UT502A

Para efectuar las mediciones con el Megger UNIT- T UT502A en la bomba de agua del ISMMM se dividió en dos el proceso, antes de arrancar el motor y luego de apagar el mismo en su horario correspondiente, el muestreo se llevó a cabo en cada una de las fases como se muestra en la figura 2.2. Se seleccionó un voltaje de testeo de 500 V, y se obtuvo la resistencia del aislamiento acorde del voltaje de prueba.

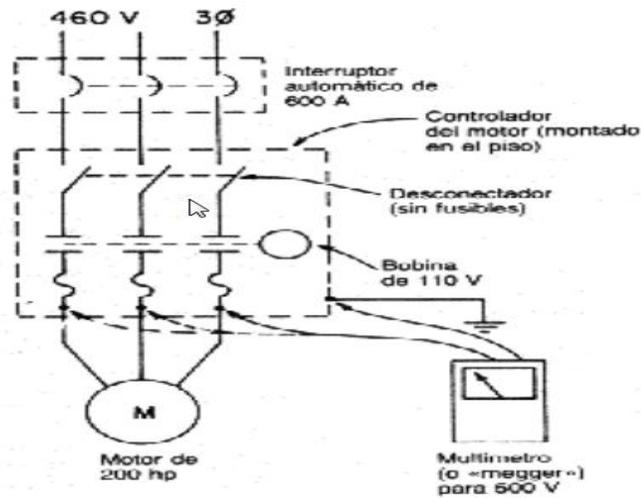


Fig. 2.2. Mediciones tomadas por el Megger en cada una de las fases

2.1.2. Pirómetro infrarrojo (medidor de temperatura)

El diseño más básico consiste en un lente para enfocar la energía infrarroja (IR) en un detector, que convierte la energía en una señal eléctrica que se puede exhibir en unidades de temperatura después de que se compensa la variación en la temperatura ambiente. Esta configuración facilita la medición de temperatura a distancia sin contacto con el objeto a medir. Como tal, el termómetro infrarrojo es útil para medir la temperatura en circunstancias en las que los termopares u otros sensores de tipo de sonda no se pueden usar o no producen datos precisos por diversas razones. Algunas circunstancias típicas son cuando el objeto a medir está en movimiento; cuando el objeto está rodeado de un campo electromagnético, como en calentamiento por inducción; cuando el objeto está contenido en un vacío u otra atmósfera controlada; o en aplicaciones en las que se requiere una respuesta rápida.

El instrumento mediante el cual se tomó la temperatura se muestra en la (figura 2.3.), este tiene disimiles funciones tales como; mide temperatura en el diapasón de $-50^{\circ}\text{C} \sim 1550^{\circ}\text{C}$, grabación de datos (hasta 100), el corte de electricidad fuera de la memoria, interruptor del láser, opción de búsqueda, alarma de temperatura baja o alta, función de retención de datos, selección entre $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}$, medición con elemento termoelectrico T-C, transmisión de datos por USB, mediciones Max/Min/Dif/Avg, montaje sobre un trípode, modo de espera e indicación de batería baja.



Fig. 2.3. Pirómetro infrarrojo

Dentro de las especificaciones técnicas tenemos que, posee pantalla LCD con iluminación del fondo $38 \times 33 \text{ mm}$, temperatura de rango $-50^{\circ}\text{C} \sim 1550^{\circ}\text{C}$, precisión $\pm 1.8^{\circ}\text{C}$ o $\pm 1.8\%$ y resolución 0.1 (cuando $< 10^{\circ}\text{C} - 0.2$). Repetitividad $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ o $\pm 0.5\%$, relación punto/distancia 50:1 Tiempo de respuesta 250 ms (95% de lectura), Respuesta espectral de $8 \mu\text{m}$ a $14 \mu\text{m}$, potencia del láser (potencia de operación de clase 2 con salida $< 1\text{mW}$ y longitud de onda $630\text{-}670 \text{ Nm}$). Emisión digital ajustable de 0.10 a 1.00 con paso 0.01, potencia USB, adaptador de potencia 9V batería (NEDA 1604, 6F22 o 006P), dimensiones mm $200 \times 130 \times 53$, y posee un peso neto de 320 g.

En la realización de los experimentos nos apoyamos en este instrumento para medir la temperatura que existía, primeramente, en los conductores, divididos por fases (A, B, C), y luego chequeamos al motor a través de la carcasa y el eje, destacar acá que las mediciones fueron tomadas con el sistema de bombeo en funcionamiento; tomamos 10 muestras, 7 en un intervalo de 10 minutos y 3 cada 20 minutos. La operación con el pirómetro fue llevada a cabo manualmente, a una distancia aproximadamente de un metro se ubica el infrarrojo en un punto y se realiza un disparo obteniendo como resultado la muestra deseada, la cual se refleja en la pantalla.

2.1.3. Analizador de redes eléctricas

Las mediciones se realizaron con el Analizador programables de redes Interlogger de 8 canales, Versión 1.3, con la Tarjeta clave Power Key Card, como eje tecnológico principal en la medición de potencias. Junto con el Data Trend (Software intuitivo del interlogger), (ver Fig 2.4).



Fig 2.4. Vista exterior del Analizador Interlogger de ocho canales

Especificaciones de la Tarjeta clave batimétrica

- Mediciones en redes de 1 fase, 2 hilos y 3 fases y 4 hilos
- Lecturas de mínima, máxima y media instantánea.
- Frecuencia instantánea
- Valor medio de las potencias activa, reactiva, aparente y factor de potencia
- Valor instantáneo de THD (tensión y corriente), componente armónica hasta el orden 50, memorización de forma de onda para tres canales
- Análisis gráfico y tabular de todas las lecturas incluyendo los cálculos de magnitudes angulares para los armónicos de corriente y tensión
- Velocidad de muestreo 128 muestras por ciclo

En las mediciones tomadas se tuvieron en cuenta las siguientes variables; corriente en cada una de las fases, al igual que la tensión, factor de potencia y potencia activa, el equipo se editó para que tomase las muestras cada un periodo de 10 minutos, data que fue recogida y procesada a través del enervista, programa encargado de realizar estas operaciones, una vez que se crea la conexión del analizador de redes eléctricas con la computadora.

2.2. Evaluación de la Incertidumbre de las mediciones realizadas en el motor del ISMM con el analizador de redes

Con el analizador de redes descrito anteriormente se obtuvieron mediciones directas de corrientes de línea (I_a , I_b , I_c) y tensiones de fase (U_{ab} , U_{bc} , U_{ca}), potencia de entrada y factor de potencia, de las cuales se determinó el valor medio de cada magnitud. A partir de estas mediciones y empleando el circuito equivalente con rama de magnetización serie mostrado en la figura 2.1 a) y b), con los parámetros del rotor referido al estator; se estima la eficiencia del motor de inducción por ser esta magnitud la que caracteriza el comportamiento del motor. Por ello se parte de que el parámetro más importante en el análisis de la incertidumbre de las mediciones realizadas con este instrumento es la eficiencia. A continuación se desarrolla el procedimiento de cálculo de la incertidumbre asociada, de aquellos parámetros que contribuyen significativamente en la incertidumbre combinada de la eficiencia estimada ya que no es necesario estimar la incertidumbre típica de cada una de las magnitudes medidas. La metodología de cálculo fue programada en el Matlab ver Anexo A.

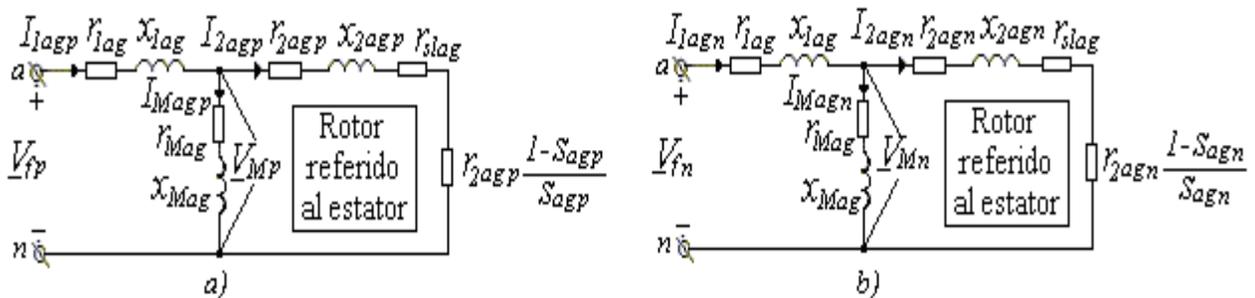


Figura 2.1: Circuito equivalente en T para secuencia directa a) e inversa b).

2.2.1. Incertidumbre en la determinación de la velocidad

La velocidad real estimada del motor depende fundamentalmente del grado de carga y del deslizamiento nominal, factores que a su vez dependen de otras magnitudes.

- **Coefficiente de carga (kc)**

El grado de carga estimado de un motor se determina por

$$k_c = \eta_n \frac{P_e}{P_n} \quad (1.13)$$

Para este caso se determina la sensibilidad ante variaciones de potencia real medida, (P_e) y el rendimiento del motor, (η_n)

$$\frac{\partial k_c}{\partial P_e} = \frac{\eta_n}{P_n} \quad \frac{\partial k_c}{\partial \eta_n} = \frac{P_e}{P_n}$$

Considerando la no existencia de correlación entre estas dos magnitudes el cuadrado de la incertidumbre viene dado por (1.14).

$$u_c^2(k_c) = \left(\frac{\partial k_c}{\partial P_e} \right)^2 u_c^2(P_e) + \left(\frac{\partial k_c}{\partial \eta_n} \right)^2 u^2(\eta_n) \quad (1.14)$$

Donde $u^2(\eta_n)$ es la varianza de la eficiencia obtenida por informaciones de catálogos de fabricantes y $u_c^2(P_e)$ la varianza de la potencia de entrada calculada.

La varianza, $u_c^2(P_e)$ para la potencia de entrada será obtenida por las mediciones a través de la incertidumbre combinada, debido a la correlación entre las magnitudes de la cual depende. Evaluando para los valores medios:

$$P_e = \sqrt{3} V_m I_m \cos \varphi_m \quad (1.15)$$

La sensibilidad ante variaciones de tensión, corriente y factor de potencia son consideradas

por $\frac{\partial P_e}{\partial V_m} = \sqrt{3} I_m \cos \varphi_m$ $\frac{\partial P_e}{\partial I_m} = \sqrt{3} V_m \cos \varphi_m$ $\frac{\partial P_e}{\partial \varphi_m} = -\sqrt{3} I_m V_m \text{sen} \varphi_m$. La

incertidumbre típica asociada a la estimación de entrada es la desviación típica experimental

de la media. $u(V_m) = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V}_m)^2}$, $u(I_m) = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I}_m)^2}$ y

$u(\varphi_m) = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (\varphi_i - \bar{\varphi}_m)^2}$ para la tensión, corriente y el factor de potencia,

respectivamente. En este caso existe correlación entre las magnitudes que la componen, por ello se toma la expresión general para el cuadrado de la incertidumbre.

$$u_c^2(P_e) = \left(\frac{\partial P_e}{\partial V_m}\right)^2 u^2(V_m) + \left(\frac{\partial P_e}{\partial I_m}\right)^2 u^2(I_m) + \left(\frac{\partial P_e}{\partial \varphi_m}\right)^2 u^2(\varphi_m) + 2 \left[\frac{\partial P_e}{\partial V_m} \frac{\partial P_e}{\partial I_m} u(V_m) u(I_m) r(V_m, I_m) + \frac{\partial P_e}{\partial V_m} \frac{\partial P_e}{\partial \varphi_m} u(V_m) u(\varphi_m) r(V_m, \varphi_m) + \frac{\partial P_e}{\partial I_m} \frac{\partial P_e}{\partial \varphi_m} u(I_m) u(\varphi_m) r(I_m, \varphi_m) \right] \quad (1.16)$$

Donde $r(V_m, I_m)$, $r(V_m, \varphi_m)$ y $r(I_m, \varphi_m)$, representa el coeficiente de correlación para cada par de variable respectivamente.

La varianza, $u^2(\eta_n)$, para el rendimiento, según la DIN EN 60034 -1/02.99 permite una tolerancia de $0.15(1-\eta_n)$ para $P_n \leq 50kW$ y $0.1(1-\eta_n)$ para $P_n > 50kW$.

- **Velocidad estimada del rotor (Ω)**

La velocidad viene dada por

$$\Omega = \Omega_n + \frac{s_n \Omega_o}{(1 - P_o/P_n)} (1 - k_c) \quad (1.17)$$

Depende fundamentalmente del coeficiente de carga y del deslizamiento nominal del motor agregado, las cuales dan la sensibilidad a tener en cuenta.

$$\frac{\partial \Omega}{\partial s_n} = \Omega_o (1 - k_c) / (1 - P_o/P_n) \quad \frac{\partial \Omega}{\partial k_c} = -s_n \Omega_o / (1 - P_o/P_n)$$

El cuadrado de la incertidumbre combinada para la velocidad

$$u_c^2(\Omega) = \left(\frac{\partial \Omega}{\partial s_n}\right)^2 u^2(s_n) + \left(\frac{\partial \Omega}{\partial k_c}\right)^2 u_c^2(k_c) \quad (1.18)$$

La varianza, $u^2(S_n)$, para el deslizamiento, según la DIN EN 60034 -1/02.99 permite una tolerancia de $\pm 20\%$ para $P_n \geq 1kW$ y $\pm 30\%$ para $P_n < 1kW$

2.2.2. Incertidumbre para las corrientes del circuito equivalente

Los valores de corrientes en el motor dependen de los parámetros del circuito equivalente para el estado de carga estudiado, por tanto, también son fuente de incertidumbre a considerar.

- **Corriente del circuito del rotor (I_2)**

$$I_2 = \frac{I_1 z_M}{\left[\left(r_M + k_{pot} r_2 \frac{(1-s_n)}{s_n} + r_2 \frac{\Omega_1}{(\Omega_1 - \Omega)} \right)^2 + (x_M + x_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (1.19)$$

Sensibilidad de la corriente del rotor ante variaciones de la velocidad

$$\frac{\partial I_2}{\partial \Omega} = - \frac{I_1 z_M r_2 \Omega_1 \left(r_M + k_{pot} r_2 \frac{(1-s_n)}{s_n} + r_2 \frac{\Omega_1}{(\Omega_1 - \Omega)} \right)}{\left[\left(r_M + k_{pot} r_2 \frac{(1-s_n)}{s_n} + r_2 \frac{\Omega_1}{(\Omega_1 - \Omega)} \right)^2 + (x_M + x_2)^2 \right]^{\frac{3}{2}} (\Omega_1 - \Omega)^2} \quad (1.20)$$

Sensibilidad de la corriente del rotor ante variaciones de la corriente del estator

$$\frac{\partial I_2}{\partial I_1} = \frac{z_M}{\left[\left(r_M + k_{pot} r_2 \frac{(1-s_n)}{s_n} + r_2 \frac{\Omega_1}{(\Omega_1 - \Omega)} \right)^2 + (x_M + x_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (1.21)$$

Sensibilidad de la corriente del rotor ante el deslizamiento nominal

$$\frac{\partial I_2}{\partial s_n} = - \frac{\frac{k_{pot} I_1 r_2 z_M}{s_n} \left(r_M + k_{pot} r_2 \frac{(1-s_n)}{s_n} + r_2 \frac{\Omega_1}{(\Omega_1 - \Omega)} \right) \left(1 + \frac{(1-s_n)}{s_n} \right)}{\left[\left(r_M + k_{pot} r_2 \frac{(1-s_n)}{s_n} + r_2 \frac{\Omega_1}{(\Omega_1 - \Omega)} \right)^2 + (x_M + x_2)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (1.22)$$

Para esta corriente se mantiene cierto grado de correlación con respecto a las variables velocidad y corriente del estator, por lo que en la incertidumbre combinada se tiene en cuenta

$$u_c^2(I_2) = \left(\frac{\partial I_2}{\partial \Omega}\right)^2 u_c^2(\Omega) + \left(\frac{\partial I_2}{\partial I_1}\right)^2 u_c^2(I_1) + \left(\frac{\partial I_2}{\partial s_n}\right)^2 u_c^2(s_n) + 2 \frac{\partial I_2^2}{\partial \Omega \partial I_s} u_c(\Omega) u_c(I_1) r(\Omega, I_1) \quad (1.23)$$

- **Corriente de la rama de magnetización (I_{Mag})**

La corriente de la rama de magnetización, de acuerdo a la norma IEEE 112 B se puede determinar aproximadamente por la raíz cuadrada de la diferencia entre la corriente del estator y rotor al cuadrado, $I_{Mag} = \sqrt{I_1^2 - I_2^2}$ de aquí se analiza la sensibilidad:

$$\frac{\partial I_{Mag}}{\partial I_1} = \frac{I_1}{[I_1^2 - I_2^2]^{\frac{1}{2}}} \quad \frac{\partial I_{Mag}}{\partial I_2} = -\frac{I_2}{[I_1^2 - I_2^2]^{\frac{1}{2}}}$$

Teniendo en cuenta la correlación entre la corriente del estator y la del rotor

$$u_c^2(I_{Mag}) = \left(\frac{\partial I_{Mag}}{\partial I_1}\right)^2 u_c^2(I_1) + \left(\frac{\partial I_{Mag}}{\partial I_2}\right)^2 u_c^2(I_2) + 2 \frac{\partial I_M^2}{\partial I_1 \partial I_2} u_c(I_1) u_c(I_2) r(I_1, I_2) \quad (1.24)$$

2.2.3. Incertidumbre para las pérdidas y potencias principales

- **Pérdidas mecánicas**

Las pérdidas mecánicas (1.25) se toman de acuerdo a la literatura especializada

$$P_{fw} = k_{fw} P_n \left(\frac{\Omega}{\Omega_n}\right)^2 = 0.052 P_n^{0.6704} \left(\frac{\Omega}{\Omega_n}\right)^2 \quad (1.25)$$

la sensibilidad ante las variaciones de las magnitudes independientes.

$$\frac{\partial P_{fw}}{\partial P_n} = 0.035 P_n^{-0.3296} \left(\frac{\Omega}{\Omega_n}\right)^2 \quad \frac{\partial P_{fw}}{\partial \Omega} = 0.104 P_n^{0.6704} \frac{\Omega}{\Omega_n^2}$$

y el cuadrado de la incertidumbre, teniendo que no existe correlación entre velocidad real y la potencia nominal de un motor.

$$u_c^2(p_{fw}) = \left(\frac{\partial p_{fw}}{\partial P_n}\right)^2 u_c^2(P_n) + \left(\frac{\partial p_{fw}}{\partial \Omega}\right)^2 u_c^2(\Omega) \quad (1.26)$$

- **Pérdidas adicionales con la carga**

$$r_{sl} = k_{pot} r_2 \frac{(1 - s_n)}{s_n}; \quad p_{sl} = 3 r_{sl} \left(\frac{I_2}{I_{2n}} \right)^2 = 3 k_{pot} r_2 \left(\frac{1 - s_n}{s_n} \right) \left(\frac{I_2}{I_{2n}} \right)^2 \quad (1.27)$$

Determinando la sensibilidad con respecto a las variables deslizamiento y corriente del rotor

$$\frac{\partial p_{sl}}{\partial I_2} = 6 k_{pot} r_2 \left(\frac{1 - s_n}{s_n} \right) \frac{I_2}{I_{2n}^2} \quad \frac{\partial p_{sl}}{\partial s_n} = - \frac{3 k_{pot} r_2}{s_n^2} \left(\frac{I_2}{I_{2n}} \right)^2$$

En este caso no se considera correlación entre la corriente del rotor y el deslizamiento nominal, y el cuadrado de la incertidumbre viene dado por (1.28).

$$u_c^2(p_{sl}) = \left(\frac{\partial p_{sl}}{\partial I_2} \right)^2 u_c^2(I_2) + \left(\frac{\partial p_{sl}}{\partial s_n} \right)^2 u_c^2(s_n) \quad (1.28)$$

- **Pérdidas en el devanado del rotor**

$$p_{el2} = 3 I_2^2 r_2; \quad \frac{\partial p_{el2}}{\partial I_2} = 6 I_2 r_2; \quad u_c^2(p_{el2}) = \left(\frac{\partial p_{el2}}{\partial I_2} \right)^2 u_c^2(I_2) \quad (1.29)$$

- **Pérdidas en el devanado del estator**

$$p_{el1} = 3 I_1^2 r_1; \quad \frac{\partial p_{el1}}{\partial I_1} = 6 I_1 r_1; \quad u_c^2(p_{el1}) = \left(\frac{\partial p_{el1}}{\partial I_1} \right)^2 u_c^2(I_1) \quad (1.30)$$

- **Pérdidas en la rama de magnetización**

$$p_{elm} = 3 I_M^2 r_M; \quad \frac{\partial p_{elm}}{\partial I_M} = 6 I_M r_M; \quad u_c^2(p_{elm}) = \left(\frac{\partial p_{elm}}{\partial I_M} \right)^2 u_c^2(I_M) \quad (1.31)$$

- **Pérdidas totales del motor**

$$P_\Sigma = p_{el1} + p_{el2} + p_{elm} + p_{slag} + p_{fw} \quad (1.32)$$

Las sensibilidades de las pérdidas totales, ante cualquier tipo de pérdida individual es la unidad, pero existe una correlación por par entre todos los componentes

$$\begin{aligned}
P_{el1} &\leftrightarrow P_{el2} & P_{el2} &\leftrightarrow P_{elm} & P_{elm} &\leftrightarrow P_{ad} & P_{sl} &\leftrightarrow P_{fw} \\
P_{el1} &\leftrightarrow P_{elm} & P_{el2} &\leftrightarrow P_{sl} & P_{elm} &\leftrightarrow P_{fw} \\
P_{el1} &\leftrightarrow P_{sl} & P_{el2} &\leftrightarrow P_{fw} \\
P_{el1} &\leftrightarrow P_{fw}
\end{aligned}$$

Expresando el cuadrado de la incertidumbre a través de esta correlación se tiene:

$$\begin{aligned}
u_c^2(p_\Sigma) = & u_c^2(p_{el1}) + u_c^2(p_{el2}) + u_c^2(p_{elm}) + u_c^2(p_{sl}) + u_c^2(p_{fw}) + 2[u_c(p_{el1})u_c(p_{el2})r(p_{el1}, p_{el2}) + \\
& + u_c(p_{el1})u_c(p_{elm})r(p_{el1}, p_{elm}) + u_c(p_{el1})u_c(p_{sl})r(p_{el1}, p_{sl}) + u_c(p_{el1})u_c(p_{fw})r(p_{el1}, p_{fw}) + \\
& + u_c(p_{el2})u_c(p_{elm})r(p_{el2}, p_{elm}) + u_c(p_{el2})u_c(p_{sl})r(p_{el2}, p_{sl}) + u_c(p_{el2})u_c(p_{fw})r(p_{el2}, p_{fw}) + \\
& + u_c(p_{elm})u_c(p_{sl})r(p_{elm}, p_{sl}) + u_c(p_{elm})u_c(p_{fw})r(p_{elm}, p_{fw}) + u_c(p_{sl})u_c(p_{fw})r(p_{sl}, p_{fw})] \quad (1.33)
\end{aligned}$$

• Potencia de salida

La potencia de salida es la diferencia entre la entrada y la suma de las pérdidas, $P_s = P_e - p_\Sigma$ la sensibilidad ante las variaciones de ambas es la unidad, $\partial P_s / \partial P_e = \partial P_s / \partial p_\Sigma = 1$ y el cuadrado de la incertidumbre se determina a través de (1.34).

$$u_c^2(P_s) = u_c^2(P_e) + u_c^2(p_\Sigma) + 2u_c(P_e)u_c(p_\Sigma)r(P_e, p_\Sigma) \quad (1.34)$$

Esta expresión tiene presente la existencia de correlación entre la potencia que demanda el motor agregado y las pérdidas totales.

2.2.4. Incertidumbre en la eficiencia

La eficiencia η , del motor del caso de estudio se determina por la relación $\eta = P_s / P_e$ y la sensibilidad viene dada por las variaciones de la potencia de entrada $\partial \eta / \partial P_e = -P_s / P_e^2$ y la potencia de salida $\partial \eta / \partial P_s = 1 / P_e$.

Teniendo la correlación entre las potencias de salida y entrada

$$u_c^2(\eta) = \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_s} \right)^2 u_c^2(P_s) + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_e} \right)^2 u_c^2(P_e) + 2 \frac{\partial \eta}{\partial P_e} \frac{\partial \eta}{\partial P_s} u_c(P_s)u_c(P_e)r(P_e, P_s) \quad (1.35)$$

2.3. Evaluación de la Incertidumbre de las mediciones en el motor del ISMM con el pirómetro y el Megger

A través del pirómetro y el Megger se analizó la temperatura y el aislamiento en el motor respectivamente, el método empleado para tomar estas mediciones fue de forma directa y para determinar la incertidumbre asociada a los resultados obtenidos se lleva a cabo a partir de la desviación típica experimental de la media:

$$u(V_m) = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V}_m)^2}$$

Donde N es el número de mediciones; V_m valor medio de la medición; V_i valor individual de las mediciones y Sumatoria es la sumatoria de todas esas desviaciones.

2.4 Conclusiones del capítulo II

- En el presente capítulo se llevó a cabo la metodología propuesta para la determinación de las incertidumbres asociadas a las mediciones obtenidas de la instrumentación empleada.
- Se describió el procedimiento del cálculo de incertidumbre combinada (u_c) de las magnitudes eléctricas analizadas.
- De forma general se estableció la base para la determinación de la calidad metrológica de la instrumentación empleada.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

Introducción

En el presente capítulo se caracteriza la instalación y se muestran los resultados obtenidos de la metodología de cálculo desarrollada en el capítulo anterior para su análisis y discusión, permitiendo llegar a conclusiones.

3.1. Caracterización de la instalación

El accionamiento objeto de estudio se encuentra en el ISMMM Dr. Antonio Núñez Jiménez, está compuesto por un motor asincrónico [16], que acciona una bomba centrífuga como se muestra en la (Figura 3.1.) La instalación presenta irregularidades tales como la no realización de mantenimientos preventivos, la estructura externa (carcasa), le fue adaptada de otro con características similares, no se cuentan con los datos de chapa y el sistema de ventilación no es propio, todo lo planteado unido a los años de explotación han ido deteriorando las condiciones mecánicas y eléctricas del mismo.



Figura 3.1. Esquema de la instalación

3.2. Análisis de la Incertidumbre para estimar la temperatura y resistencia de aislamiento

En la evaluación de la calidad de los resultados de las mediciones de temperatura, y aislamiento, el aspecto más importante lo constituye el estudio y evaluación de la incertidumbre. Aunque las mediciones realizadas de temperatura y aislamiento fueron mediciones directas y no están afectadas por la propagación de errores que caracteriza a las mediciones de magnitudes indirectas, existe una incertidumbre asociada a los valores de cada magnitud medida.

Para estimar la incertidumbre de estas mediciones no se tuvo en cuenta la desviación típica experimental de la media ($u(V_m)$) ya que se realizaron de forma progresiva y el valor medio podría no ser característico.

Definición del proceso de cálculo y medición

Las variables que se midieron fueron la temperatura; y la resistencia de aislamiento en el motor. Se tomó la temperatura en los conductores, chequeando el valor que existía en cada una de las fases, y por último se estimó la temperatura que existía en la máquina a través de la carcasa y el eje, el instrumento mediante el cual se llevó a cabo el proceso de medición fue el pirómetro infrarrojo. Para determinar el aislamiento del motor se utilizó un Megger, donde se midió la resistencia en cada fase en dos momentos como se muestra en la (tabla 3.2.).

Reporte del resultado

Como no existen medidas repetitivas (o sea donde solo se midió una vez, aunque sean varias de formas progresivas), la incertidumbre típica es el grado de precisión del instrumento, el error de la medición está dada por esa precisión, que sería el error que cometemos cuando no repetimos las mediciones, de ahí que la incertidumbre asociada a los resultados de temperatura mostrados en la (tabla 3.1) , es de ± 1.8 °C; mientras que la incertidumbre de los resultados de la resistencia de aislamiento viene dada por el voltaje de testeo que se tomó que fue de 500 V, el resultado está dentro de los valores de $100 \text{ M}\Omega \sim 5.5 \text{ G}\Omega$, como se muestra en la (tabla 3.2.) y la incertidumbre asociada a este resultado es de $\pm(5\%+5)$.

Tabla 3.1. Muestras tomadas por el Pirómetro infrarrojo

Temperatura (°C)	Conductores	Hora	2:00	2:10	2:20	2:30	2:40	2:50	3:00	3:20	3:40	4:00
		Fase A	26.4	27.2	28.5	30.6	32.1	32.1	33.7	34.0	34.0	34.9
		Fase B	26.2	26.0	26.2	26.9	27.9	28.3	29.3	30.4	31.4	31.6
		Fase C	26.8	26.2	26.4	26.7	27.4	28.1	28.4	29.5	30.2	30.6
	Motor	Carcas a	31.1	37.1	40.9	45.1	45.5	45.9	55.6	56.5	58.7	60.9
		Eje	30.3	32.5	34.5	39.6	44.9	48.0	51.4	54.3	59.8	60.1

Tabla 3.2. Mediciones realizadas por el Megger

Fase	Aislamiento (GΩ)	
	Antes de arrancar el motor	Después de apagar el motor
A	5.50	5.50
B	5.50	5.50
C	5.50	5.50

3.3. Análisis de la incertidumbre para la medición de la eficiencia

Las mediciones de tensión, corriente, potencia y factor de potencia realizadas con el analizador de redes mostradas en la tabla 3.3, fueron utilizadas en la obtención de la eficiencia ($\eta_{cal} = P_2/P_1$), al calcular la incertidumbre asociada a los resultados obtenidos de estos parámetros, se recogen las incertidumbres de otras magnitudes influyentes, como las pérdidas y otras que fueron analizadas en el comportamiento del motor que acciona la bomba de agua del ISMM. La propagación de los errores al obtener estas magnitudes fueron obtenidas a partir de las ecuaciones (1.5) a la (1.12) descritas en el capítulo uno. A continuación, se muestran los resultados de las incertidumbres de dichas magnitudes.

Tabla 3.3. Datos promedios obtenidos por el analizador de redes eléctricas

P_{promedio} (kW)	U_{promedio} (V)	I_{promedio} (A)	CosFi
21.48	235.84	62.19	0.85
21.36	235.69	62.06	0.84
21.4	235.79	62.04	0.84
21.33	235.44	62.28	0.84
21.29	235.58	61.87	0.84
21.16	235.32	61.94	0.84
21.13	235.35	61.48	0.84
21.16	235.68	61.66	0.84
21.17	235.87	61.54	0.84
21.17	235.92	61.44	0.84
21.09	235.69	61.47	0.84
21.15	236.14	61.29	0.84
21.07	236.05	61.61	0.84
21.12	236.06	61.75	0.84
21.04	235.78	61.4	0.84
20.94	235.69	61.24	0.84
21.01	235.64	61.31	0.84
21	235.68	61.3	0.84
21.04	235.58	61.56	0.84
21.1	235.27	61.46	0.84

3.3.1. Incertidumbre para las corrientes del circuito equivalente del motor

Los valores de corrientes en el motor dependen de los parámetros del circuito equivalente para el estado de carga estudiado, por tanto, también son fuente de incertidumbre a considerar, (corriente en el estator y corriente en la rama de magnetización). Para estimar la incertidumbre de la corriente del rotor (I_2), se debe de tener en cuenta la sensibilidad de esta corriente ante variaciones de la velocidad, de la corriente del estator y ante el deslizamiento nominal. Para esta corriente se mantiene cierto grado de correlación con respecto a las variables velocidad y corriente del estator, correlación que a la hora de calcular la incertidumbre combinada se tiene en cuenta debido a la propagación de los errores, entonces la incertidumbre típica combinada de la corriente del rotor es $u_c(I_2) = 0.1403$.

La corriente de la rama de magnetización, de acuerdo a la norma IEEE 112 B se puede determinar aproximadamente por la raíz cuadrada de la diferencia entre la corriente del estator y rotor al cuadrado, $I_{Mag} = \sqrt{I_1^2 - I_2^2}$, al analizar la sensibilidad entre estas magnitudes y teniendo en cuenta la correlación que existe entre ellas (I_1 ; I_2), la incertidumbre típica combinada es $u_c(I_m) = 0.6469$.

Incertidumbre expandida

A continuación, se muestran los resultados de las incertidumbres de las magnitudes, medidas por el analizador de redes, valorando este intervalo de confianza que se le suman a las mediciones.

Tomando un factor de cobertura de $k = 2$

$$U(I_2) = 2 \cdot u_c(I_2) = 2 \cdot 0.1403 = 0.2806$$

$$U(I_{Mag}) = 2 \cdot u_c(I_{Mag}) = 2 \cdot 0.6469 = 1.2938$$

Reporte del resultado

De los cálculos realizados la $I_2 = 61.04$ A, con una variación posible de ± 0.28 , dando un intervalo de confianza del 95%, comprendido entre 60.76 y 61.32, mientras que la $I_{Mag} = 8.52$ A, con una variación posible ± 1.29 , con el mismo intervalo de confianza comprendido entre 7.23 y 9.81.

3.3.2. Incertidumbre para la potencia de entrada

Las distribuciones de valores estimados para la potencia de entrada, se obtendrán a través de la incertidumbre combinada, debido a la correlación entre las magnitudes de la cual depende evaluando para los valores medios:

$$P_1 = \sqrt{3} V_m I_m \cos \varphi_m$$

Donde son consideradas la sensibilidad ante variaciones de tensión, corriente y factor de potencia. La incertidumbre típica asociada a la estimación de entrada es la desviación típica experimental de la media, para la tensión, corriente y el factor de potencia, respectivamente. En este caso existe correlación entre las magnitudes que la componen, por ello se toma la expresión general para el cuadrado de la incertidumbre. Como valor final de incertidumbre

combinada para estas variables se obtuvo, $u_c(U_m) = 0.0493$; $u_c(I_m) = 0.0648$; $u_c(fp) = 0.0005$; $u_c(P_1) = 0.0199$.

Incertidumbre expandida

$$U(U_m) = 2 \cdot u_c(U_m) = 2 \cdot 0.0493 = 0.0986$$

$$U(I_m) = 2 \cdot u_c(I_m) = 2 \cdot 0.0648 = 0.1296$$

$$U(fp) = 2 \cdot u_c(fp) = 2 \cdot 0.0005 = 0.001$$

$$U(P_1) = 2 \cdot u_c(P_1) = 2 \cdot 0.0199 = 0.0398$$

Reporte del resultado

Una vez calculada la incertidumbre expandida, se puede dar el reporte del resultado de cada una de las magnitudes, donde se tiene el valor medio de la medición que se realizó, con la incertidumbre asociada, quedando de la siguiente forma; $U_m = 235.70$ V, con una variación posible de ± 0.1 , comprendido entre 235.6 y 235.8. La corriente del motor fue de $I_m = 61.64$ A, con una variación posible de ± 0.13 , comprendido entre 61.51 y 61.77, el factor de potencia fue de $F_p = 0.841$, con una variación posible de ± 0.001 , comprendido entre 0.84 y 0.842. Finalmente vistas las incertidumbres de las magnitudes de las cuales depende la P_1 , y teniéndolas en cuenta, se obtuvo el resultado con la incertidumbre asociada a este, $P_1 = 21.16$ kW, con una variación posible de ± 0.04 , comprendido entre 21.12 y 21.2, todas estas incertidumbres fueron calculadas, y el resultado obtenido nos brinda un intervalo de confianza del 95 % [17].

3.3.3. Incertidumbre para las pérdidas y potencias principales del motor

Para estimar la incertidumbre de las pérdidas mecánicas se analizó la sensibilidad ante las variaciones de las magnitudes independientes, teniendo en cuenta que no existe correlación entre velocidad real y la potencia nominal de un motor, la incertidumbre típica combinada está dada por $u_c(P_{fw}) = 0.001$.

Al estimar la incertidumbre para las pérdidas adicionales con la carga se determinó la sensibilidad con respecto a las variables deslizamiento y corriente del rotor, en este caso no se consideró la correlación entre la corriente del rotor y el deslizamiento nominal, y como resultado se obtuvo una incertidumbre típica combinada de $u_c(P_{ad}) = 0.007$

Se obtuvieron, además, las incertidumbres combinadas para las pérdidas en el devanado del rotor $u_c(P_{el2}) = 0.001$; pérdidas en el devanado del estator $u_c(P_{el1}) = 0.001$ y pérdidas totales del motor, las sensibilidades de las pérdidas totales, ante cualquier tipo de pérdida individual es la unidad, pero existe una correlación por par entre todos los componentes, a través de esta correlación se tiene como incertidumbre $u_c(Z_p) = 0.8543$. La potencia de salida se obtiene al restarle a la potencia de entrada, la sumatoria de todas estas pérdidas ($P_s = P_e - p_\Sigma$), la sensibilidad que se obtiene ante las variaciones de estas dos magnitudes ($P_2; P_1$), es la unidad, y al tener presente la existencia de correlación entre la potencia que demanda el motor y las pérdidas totales se concluye que la $u_c(P_2) = 0.8518$.

Incertidumbre expandida

$$U(P_{fw}) = 2 \cdot u_c(P_{fw}) = 2 \cdot 0.001 = 0.002$$

$$U(P_{ad}) = 2 \cdot u_c(P_{ad}) = 2 \cdot 0.007 = 0.014$$

$$U(P_{el2}) = 2 \cdot u_c(P_{el2}) = 2 \cdot 0.001 = 0.002$$

$$U(P_{el1}) = 2 \cdot u_c(P_{el1}) = 2 \cdot 0.001 = 0.002$$

$$U(Z_p) = 2 \cdot u_c(Z_p) = 2 \cdot 0.8543 = 1.7086$$

$$U(P_2) = 2 \cdot u_c(P_2) = 2 \cdot 0.8518 = 1.7036$$

Reporte del resultado.

Al realizar los cálculos con un intervalo de confianza del 95 %, se obtuvieron como resultado de las pérdidas mecánicas $P_{fw} = 0.418$ kW, con una variación posible de ± 0.002 , comprendida entre 0.416 y 0.42. Las pérdidas adicionales con la carga son de $P_{ad} = 0.39$ kW, con una variación posible de ± 0.01 , comprendida entre 0.38 y 0.4. Las pérdidas eléctricas en el devanado del rotor fueron de $P_{el2} = 0.272$ kW, con una variación de ± 0.002 , proporcionando un intervalo de confiabilidad entre 0.27 y 0.274, mientras que las que existen en el devanado del estator son de $P_{el1} = 0.397$ kW, con una variación de ± 0.002 , y un intervalo comprendido entre 0.395 y 0.399. Como pérdidas totales se obtuvo como resultado $Z_p = 2.7$ kW, con una variación posible de ± 1.7 , comprendida entre 1 y 4.4 y la potencia de salida que se obtuvo fue de $P_2 = 18.5$ kW, con una variación de ± 1.7 , proporcionando un intervalo de confianza entre 16.8 y 20.2.

3.3.4. Incertidumbre en la eficiencia

Finalmente se evidencian los resultados de la eficiencia, al tener la incertidumbre de esta magnitud, nos da un margen de la propagación de errores que hubo en el proceso de medición llevado a cabo a través del analizador de redes, la eficiencia η , del motor se determina por la relación $\eta = P_s/P_e$, estas magnitudes de las que depende, a la vez dependen de otras y toda esa incertidumbre se va propagando hasta obtener la incertidumbre del rendimiento, la sensibilidad en esta expresión viene dada por las variaciones de la potencia de entrada $\partial\eta/\partial P_e = -P_s/P_e^2$ y la potencia de salida $\partial\eta/\partial P_s = 1/P_e$. Teniendo en cuenta la correlación que existe entre la potencia de salida y entrada, la incertidumbre típica combinada es $U_c = 0.0394$, tomando un factor de cobertura de $K = 2$, la incertidumbre expandida es; $U(\eta) = 2 \cdot u_c(\eta) = 2 \cdot 0.0394 = 0.08$.

Reporte del resultado

$$\eta = 0.87 \pm 0.08$$

De los cálculos realizados la eficiencia es $\eta = 0.87$, con una variación posible de ± 0.08 , dando un intervalo de confianza del 95%, comprendido entre 0.79 y 0.95. Este intervalo de variabilidad junto al intervalo de confianza, aseguran con certeza que el valor de la eficiencia estará en ese rango.

3.4. Conclusiones del capítulo III

- La incertidumbre en las mediciones de temperatura que se obtienen con el pirómetro empleado es de $\pm 1,8$ °C lo que garantiza que las mediciones de temperatura estén dentro de ese intervalo.
- La incertidumbre en las mediciones de la resistencia de aislamiento que se obtienen con el Megger empleado fue de $\pm (5\% + 5)$, para el voltaje de testeo seleccionado al realizar la prueba, el resultado obtenido estaba en el rango de garantizando un intervalo confiable.
- La metodología de cálculo para la incertidumbre de los resultados de las mediciones obtenidas con el analizador de redes arroja un intervalo de confianza de 21.16 ± 0.04 kW para la potencia de entrada medida y de 18.5 ± 1.7 kW para la potencia de salida estimada, lo que demuestra la teoría de la propagación de errores, al comparar sus incertidumbres.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se establecieron las bases teóricas de la evaluación de la incertidumbre asociada a los resultados de mediciones, así como causas de error en las mediciones e instrumentos empleados en el estudio del comportamiento energético de los motores eléctricos.
2. Se estableció una metodología de cálculo de incertidumbre para los resultados de las mediciones involucradas en la estimación de la eficiencia del motor del ISMM.
3. La evaluación de la incertidumbre para la eficiencia estimada del motor del ISMM, a partir de las mediciones realizadas con el analizador de redes, bajo un intervalo de confianza del 95%, comprendido entre 0.79 y 0.95, demuestra en primer lugar la calidad metrológica del instrumento, y del resultado obtenido, segundo que las mediciones realizadas con él pueden ser utilizadas en la toma de decisiones y tercero pueden ser empleadas en el diagnóstico, pronóstico y seguimiento de fallas.

RECOMENDACIONES

1. La instalación de un analizador de redes en el accionamiento, que permita el control y seguimiento de los parámetros eléctricos del motor, ya que este es el equipo más adecuado para auditorías energéticas por su versatilidad en la medición de las diversas variables eléctricas.
2. La planificación de mantenimientos preventivos donde se le dé seguimiento al motor a través del equipamiento portátil asistido por CEETAM, con el objetivo de erradicar la ocurrencia de fallas.
3. Realizar un estudio que permita la instalación de protecciones, ante ocurrencias de fallas en el motor.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Vim, "International vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM)," *International Organization*, vol. 2004, pp. 09-14, 2004.
- [2] W. D. Cooper and A. D. Helfrick, "Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición," *Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana, SA México*, 1991.
- [3] R. Dybkaer, "Result, error and uncertainty," *Scandinavian journal of clinical and laboratory investigation*, vol. 55, pp. 97-118, 1995.
- [4] W. Bablok and H. Passing, "Application of statistical procedures in analytical instrument testing," *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, vol. 7, pp. 74-79, 1985.
- [5] M. Eléctricas, J. Sabato, and M. E. J. A. Suárez, "2. SUMILLA."
- [6] A. Marques, M. Kothe, and E. B. Mendes, "Error de medición," 2016.
- [7] M. Cheesbrough, *Medical laboratory manual for tropical countries* vol. 1: M. Cheesbrough, 14 Bevills Close, Dodington, Cambridgeshire, PE15 OTT., 1981.
- [8] R. A. de la Lengua, R. Academia, E. Calpe, E. Secundaria, E. ESPAÑOLA, J. LUIS, *et al.*, "Diccionario de la Lengua Española vol. I," *Real Academia Española, Madrid*, 1992.
- [9] S. T. C. THEREFORE and M. AS, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement," 1995.
- [10] EURACHEM., *Quantifying uncertainty in analytical measurement: Crown (IS)*, 1995.
- [11] J. Kragten, "Tutorial review. Calculating standard deviations and confidence intervals with a universally applicable spreadsheet technique," *Analyst*, vol. 119, 1994.
- [12] C. A. Jerez Mayorga, "Laboratorio virtual para el análisis predictivo de fallas en motores de inducción de baja potencia," 2012.
- [13] J. Hidalgo, "Análisis de las zonas de falla de motores eléctricos," *San José de Costa Rica. Grupo TERMOGRAM. sf*, 2013.
- [14] A. Muñoz-Potosi, L. Pencue-Fierro, and J. León-Téllez, "Análisis Termográficos para la Determinación de Puntos Críticos en Equipos Mecánicos y Electricos," *Bistua. Revista de la Facultad de Ciencias Básicas.*, vol. 7, 2009.
- [15] S. Bilbao Eguren and M. Gravía García, "Reconocimiento de objetos a partir de imágenes termográficas," 2012.

- [16] R. F. Benito, *Máquinas eléctricas*: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Sección de Publicaciones, 1970.
- [17] J. Burns, P. Campion, and A. Williams, "Error and uncertainty," *Metrologia*, vol. 9, p. 101, 1973.

ANEXOS A: Parte de la programación realizada en matlab para determinar la incertidumbre

% FUNCTION INCERTIDUMBRE_GENERAL

Clear, clc
format short g

% D_nom = [Pn(kW) Un(V) ln(A) nn(rpm) cosFi Ef p]
D_nom = [22.5 220 73.74 3550 0.88 0.91 1];

% D_ceq = [R1 X1 R2 X2 Rc Xm Rad] CE en paralelo
D_ceq = [0.0348 0.1835 0.0243 0.2752 25.9574 8.4908 0.0475];

% MD = [kW Uprom Iprom CosFi] % Datos medidos

DM =	[21.48	235.84	62.19	0.85
	21.36	235.69	62.06	0.84
	21.4	235.79	62.04	0.84
	21.33	235.44	62.28	0.84
	21.29	235.58	61.87	0.84
	21.16	235.32	61.94	0.84
	21.13	235.35	61.48	0.84
	21.16	235.68	61.66	0.84
	21.17	235.87	61.54	0.84
	21.17	235.92	61.44	0.84
	21.09	235.69	61.47	0.84
	21.15	236.14	61.29	0.84
	21.07	236.05	61.61	0.84
	21.12	236.06	61.75	0.84
	21.04	235.78	61.4	0.84
	20.94	235.69	61.24	0.84
	21.01	235.64	61.31	0.84
	21	235.68	61.3	0.84
	21.04	235.58	61.56	0.84
	21.1	235.27	61.46	0.84

Para todos los casos “mean” significa valor medio y sqrt () es raíz cuadrada, en este caso de 3.

% 1. POTENCIA DE ENTRADA Y SU CORRELACIÓN CON (I, U, Fi)

dP1_dUm = sqrt (3)*mean (Im)*mean (fpm); % Sensibilidad por variación tensión medida

$$P_{eag} = \sqrt{3} V_m I_m \cos \varphi_m \quad (1.36)$$

dP1_dlm = sqrt (3)*mean (Um)*mean (fpm); % Sensibilidad por variación corriente medida

$$\frac{\partial P_e}{\partial I_m} = \sqrt{3} V_m \cos \varphi_m$$

dP1_dfpm = -sqrt (3)*mean (Im)*mean (Um); % Sensibilidad por variación tensión medida

u_ Um = std (Um)/sqrt (24); % Incertidumbre típica de tensión medida
u_ Im = std (Im)/sqrt (24); % Incertidumbre típica de corriente medida
u_ fpm = std (fpm)/sqrt (24); % Incertidumbre típica de factor de potencia medido

r_ Umlm = corrcoef(Um, Im); Rui = r_ Umlm(1,2); % Coeficiente de correlación Um-Im

r_ Umfpm = corrcoef(Um,fpm); Ruf = r_ Umfpm(1,2); % Coeficiente de correlación Um-Fim

r_ Imfpm = corrcoef(Im,fpm); Rif = r_ Imfpm(1,2); % Coeficiente de correlación Im-Fim

Uc_P1m = sqrt((dP1_dUm*u_ Um) ^2 + (dP1_dlm*u_ Im) ^2 + (dP1_dfpm*u_ fpm) ^2 +...
2*(dP1_dUm*dP1_dlm*u_ Um*u_ Im*Rui +
dP1_dUm*dP1_dfpm*u_ Um*u_ fpm*Ruf +...
dP1_dlm*dP1_dfpm*u_ Im*u_ fpm*Rif))*1e-3;

% DATOS DE SALIDA, se relacionan con la potencia, tensión corriente y factor de potencia, mediciones

UU (No, :) = [mean (P1m) uc_P1m mean (Um) u_ Um mean (Im) u_ Im mean (fpm) u_ fpm]; % Datos de salidas

inc1 = fopen('Inc_Pot_Ent.txt','wt');

fprintf('MAGG','P1m(kW)','uc(P1m)','Um(V)','uc(Um)','Im(A)','uc(Im)','CosFm','uc_fp');
fprintf (inc1, '\n');
fprintf (inc1, '%6.0f, %10.2f, %10.4f, %10.2f, %10.4f, %10.4f, %10.4f\n', UU);
fclose (inc1);

P1m(kW)	uc(P1m)	Um(V)	uc(Um)	Im(A)	uc(Im)	CosFm	uc(fp)
21.16	0.0199	235.70	0.0493	61.64	0.0648	0.8405	0.0005