



RECOMENDACIONES METROLÓGICAS PARA LABORATORIOS EN MAGNITUDES ELÉCTRICAS DE TENSIÓN, INTENSIDAD DE CORRIENTE Y RESISTENCIA

INM/GTM EM-CCA/03

Bogotá

Fecha de publicación (2021-mm-dd)

Versión No. 1

Código: M6-01-F-02 (V1)



El progreso
es de todos

Mincomercio

PRESENTACIÓN

Este documento es el resultado del trabajo conjunto entre el Instituto Nacional de Metrología de Colombia - INM, miembros de la Red Colombiana de Metrología - RCM (Grupos de Trabajo por Magnitud) y el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia – ONAC, con el fin armonizar métodos de medición y propender por la uniformidad y coherencia en criterios técnicos mínimos a emplear por los laboratorios y usuarios de estos métodos. Este documento se ha elaborado recogiendo el conocimiento y la experiencia de los miembros del equipo de trabajo.

En este sentido lo consignado en este documento constituye en un referente para:

- a. El Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC.
- b. Los laboratorios que realicen mediciones relacionados con los criterios técnicos consignados aquí.



EQUIPO DE TRABAJO

Este documento fue elaborado en el espacio del Grupo Técnico por Magnitud de corriente, resistencia y tensión de la Red Colombiana de Metrología. Para el desarrollo del documento se contó con la participación de los profesionales: Mauricio Sáchica Avellaneda, Alexander Martínez López y Nelson Duvan Vargas Sáenz del Instituto Nacional de Metrología de Colombia – INM. También participó el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC y los laboratorios de calibración que han participado en las reuniones del grupo técnico.

REVISIÓN

Mesa de Trabajo Técnico Científico de la Subdirección de Metrología Física.



TABLA DE CONTENIDO

1. OBJETIVO.....	5
2. ALCANCE	5
3. ABREVIATURAS, SIGLAS Y SÍMBOLOS	5
4. DEFINICIONES	5
5. GENERALIDADES	7
6. RECOMENDACIONES TÉCNICAS EN TOMA DE DATOS, TRATAMIENTO DE DATOS, RESULTADOS E INCERTIDUMBRE	7
6.1 Cómo y cuántos datos u observaciones se deben tomar por cada punto de medición.....	7
6.2 Cómo obtener la incertidumbre cuando se realiza interpolación.....	8
6.3 Incertidumbre por redondeo	9
6.4 Reporte de resultados	12
7. INTERPRETACIÓN Y USO DE CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN	12
7.1 Interpretación de resultados en certificados de calibración	12
7.2 Aplicación de correcciones.....	13
8. ERRORES COMUNES EN MEDICIONES DE MAGNITUDES ELÉCTRICAS Y TÉCNICAS PARA MITIGAR SU EFECTO SOBRE LOS RESULTADOS DE MEDIDA	14
8.1 Configuraciones y correcciones para la medición de resistencia eléctrica a 2 hilos.....	14
8.2 FEM termoelectricas	14
8.3 Impedancia de entrada de multímetros	16
9. PATRONES DE MEDIDA EN MAGNITUDES ELÉCTRICAS.....	17
9.1 Selección de patrones de medida en magnitudes eléctricas	17
9.2 Características de los patrones de medida e influencia en los sistemas de medición.....	18
10. RECOMENDACIONES PARA LAS INSTALACIONES Y EL CONTROL DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES	19
11. CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA MEDIDAS EN MAGNITUDES ELÉCTRICAS.....	20
11.1 Tensión eléctrica continua e intensidad de corriente eléctrica continua.....	20
11.2 Tensión eléctrica alterna e intensidad de corriente eléctrica alterna.....	20
11.3 Resistencia eléctrica	20
11.4 Guardas y tierras.....	21
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22



1. OBJETIVO

Proporcionar recomendaciones técnicas y algunos lineamientos generales para mediciones en magnitudes eléctricas, para asegurar la validez los resultados de medición y calibración en estas magnitudes.

2. ALCANCE

La aplicación de la presente guía va dirigida a laboratorios de calibración y su alcance se limita a las magnitudes eléctricas de tensión continua, tensión alterna, intensidad de corriente continua, intensidad de corriente alterna y resistencia.

3. ABREVIATURAS, SIGLAS Y SÍMBOLOS

Tabla 1. Abreviaturas, siglas y símbolos

Abreviatura, siglas y símbolos	Descripción
p_i	Punto de medición i
c_i	Resultado de calibración para el punto i
$u(c)$	Incertidumbre estándar combinada de c
U	Incertidumbre expandida
$f(x)$	Función de densidad de probabilidad para una magnitud que toma valores x
E_n	Error normalizado
n	Número de observaciones

4. DEFINICIONES

Para los propósitos de este documento se aplican las siguientes definiciones tomadas de la referencia (1), además de otras específicas.

EXACTITUD DE MEDIDA. Proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando (VIM 2.13 (1)).

El concepto “exactitud de medida” no es una magnitud y no se expresa numéricamente. Se dice que una medición es más exacta cuanto más pequeño es el error de medida.

ERROR DE MEDIDA. Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia (VIM 2.16 (1)).

FEM. Fuerza electromotriz generada por la unión de dos materiales conductores diferentes, en presencia de un gradiente de temperatura.

INCERTIDUMBRE DE MEDIDA. Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza (VIM 2.26 (1)).

INTERVALO DE COBERTURA. Intervalo que contiene el conjunto de valores verdaderos de un mensurando con una probabilidad determinada, basada en la información disponible (VIM 2.36 (1)).



PROBABILIDAD DE COBERTURA. Probabilidad de que el conjunto de los valores verdaderos de un mensurando esté contenido en un intervalo de cobertura especificado (VIM 2.37 (1)).

CALIBRACIÓN. Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación (VIM 2.39 (1)).

TRAZABILIDAD METROLÓGICA. Propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida (VIM 2.41 (1)).

NOTA: La trazabilidad debe indicarse al sistema internacional de unidades y no a una institución particular como un instituto nacional de metrología.

AJUSTE DE UN SISTEMA DE MEDIDA. Conjunto de operaciones realizadas sobre un sistema de medida para que proporcione indicaciones prescritas, correspondientes a valores dados de la magnitud a medir (VIM 3.11 (1)).

Dependiendo del instrumento, el ajuste se puede realizar por medio físico sobre algún componente del instrumento o por medio de software del instrumento.

AJUSTE DE CERO DE UN SISTEMA DE MEDIDA. Ajuste de un sistema de medida para que éste proporcione una indicación nula cuando la magnitud a medir tenga valor cero (VIM 3.12 (1)).

RESOLUCIÓN DE UN DISPOSITIVO VISUALIZADOR. Mínima diferencia entre indicaciones visualizadas, que puede percibirse de forma significativa (VIM 4.15 (1)).

NOTA: Para un dispositivo visualizador digital, corresponde al mínimo cambio de la cifra menos significativa.

INCERTIDUMBRE INSTRUMENTAL. Componente de la incertidumbre de medida que procede del instrumento o sistema de medida utilizado (VIM 4.24 (1)).

Para esta guía la información relativa a la incertidumbre instrumental es la que aparece en las especificaciones del instrumento.

CALIBRADOR. Patrón utilizado en calibraciones (VIM 5.12 (1)).

CALIBRADOR MULTIFUNCIÓN. Instrumento que suministra en sus bornes de salida magnitudes eléctricas, tales como: tensión continua, intensidad de corriente continua, tensión alterna, intensidad de corriente alterna, resistencia, capacitancia y otras en distintos intervalos de medida, que son usados para la calibración tanto de multímetros digitales, analógicos y otros instrumentos de medición (2).

TENSIÓN DISPONIBLE "COMPLIANCE VOLTAGE". Es la tensión máxima que una fuente de corriente constante puede proporcionar para generar la corriente especificada (3) (Electropedia 314-04-10 (4)).

TIEMPO DE INTEGRACIÓN. Periodo de tiempo que los medidores digitales toman para muestrear la señal de entrada, usualmente se expresan en términos del número de ciclos de la red de alimentación NPLC (Number of Power Line Cycles). Por ejemplo, 10 NPLC en alimentación de 60 Hz equivale a $(1/60 \text{ Hz}) \times 10 = 166 \text{ ms}$.

5. GENERALIDADES

La metrología en magnitudes eléctricas involucra un conjunto de conocimientos y experiencias que, aunque está fundamentado en una base metrológica general y soportado por la física, las matemáticas y la estadística, es específico de acuerdo con la magnitud, los intervalos de medición, las condiciones de medición, la exactitud esperada, los patrones de medida, entre otros aspectos.

Este documento recopila detalles y recomendaciones técnicas para una correcta medición y posterior reporte de resultados de algunas magnitudes eléctricas. Esta guía busca dar soporte y lineamientos en las mediciones en magnitudes eléctricas y puede ser usada como base para la elaboración de procedimientos e instructivos prácticos por parte de los laboratorios de calibración y ensayo.

Se deben considerar prácticas apropiadas en la toma de datos y el tratamiento de los mismos, los cuales serán utilizados posteriormente para obtener los respectivos resultados de medición. Garantizar la trazabilidad metrológica involucra el conocimiento y uso adecuado de los respectivos certificados de calibración, los patrones de medida y en general todos los elementos del sistema de medición particular, el nivel de detalle con el cual se deben conocer estos elementos del sistema de medición depende de la exactitud que se pretenda alcanzar en la medición (numeral 7.1.1 de (5)). Los sistemas de medida incluyen un conjunto de elementos, condiciones específicas de operación, conceptos y modelos teóricos, el desconocimiento de la interacción entre los elementos o su afectación ante las condiciones de operación, el modelamiento inadecuado o errores conceptuales pueden generar errores en las mediciones y por lo tanto la generación de resultados de medición erróneos. La selección de los patrones de medida, el correcto control de las condiciones de medición y el conocimiento adecuado del mensurando son importantes para lograr un balance óptimo entre calidad y costos.

En los siguientes numerales se proporcionan recomendaciones técnicas y ejemplos de aplicación práctica para la medición de las magnitudes eléctricas indicadas en el alcance.

6. RECOMENDACIONES TÉCNICAS EN TOMA DE DATOS, TRATAMIENTO DE DATOS, RESULTADOS E INCERTIDUMBRE

6.1 Cómo y cuántos datos u observaciones se deben tomar por cada punto de medición

En un procedimiento de medición es importante garantizar la independencia de las observaciones repetidas en la toma de datos llevada a cabo. La independencia de las observaciones requiere en lo posible repetir el procedimiento de calibración “n” veces variando los valores de prueba y dejando que el equipo bajo prueba retorne al equilibrio en el punto de medición (numeral F.1.1.2 de (5)). No se deben tomar datos de medición como el mayor observado, o el menor observado, ya que esto genera un sesgo en la información utilizada para obtener el promedio, en una indicación digital si las cifras menos significativas cambian continuamente, no se deben seleccionar valores preferidos por el observador, la observación debe ser lo más aleatoria posible, es preferible usar un medio para congelar la indicación en un instante arbitrario y registrar este resultado (numeral F.1.1.5 de (5)).

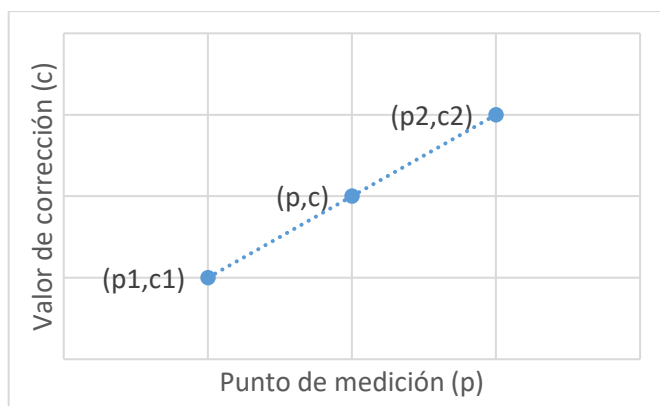
La cantidad de observaciones a tomar dependerá de la dispersión de dichas observaciones. Es decir, sistemas con baja dispersión requieren menor número de observaciones que sistemas con alta dispersión. Se debe garantizar que las observaciones repetidas tomadas logren hacer una evaluación confiable de la dispersión de la población de valores del equipo bajo prueba, por medio de la desviación estándar (numeral 4.2.3 de (5)).

La cantidad de observaciones a tomar, también depende de los lineamientos de los laboratorios para expresar la incertidumbre de medida. Si se cuenta con sistemas de medición patrón con componentes

de incertidumbre muy pequeñas respecto a la incertidumbre tipo A de las observaciones, es necesario tomar mayor cantidad de muestras para que los grados efectivos de libertad sean lo suficientemente altos y así poder garantizar un factor de cobertura igual a 2 (para un 95.45 % de probabilidad de cobertura), si esto es un requisito de los procedimientos del laboratorio o si se desea reportar incertidumbres más pequeñas.

6.2 Cómo obtener la incertidumbre cuando se realiza interpolación

Cuando se conoce y se ha evidenciado el comportamiento lineal de un patrón de medida, es posible realizar interpolación.



Si se tienen los resultados de calibración (c_1, c_2) de un patrón de medida en dos puntos de medición (p_1, p_2) y se desea estimar su valor de corrección c en un punto intermedio p se puede realizar una interpolación, cuyo modelo es el siguiente:

$$c = \left(\frac{p_2 - p}{p_2 - p_1} \right) c_1 + \left(\frac{p - p_1}{p_2 - p_1} \right) c_2$$

Para estimar la incertidumbre estándar del valor c obtenido por interpolación, se utiliza el modelo indicado previamente, teniendo como magnitudes de entrada, los resultados de calibración c_1, c_2 con incertidumbres estándar $u(c_1), u(c_2)$ respectivamente. Se considera correlación completa entre los valores c_1 y c_2 , es decir coeficiente de correlación $r(c_1, c_2) = 1$, teniendo en cuenta que hacen parte de un mismo patrón, un mismo intervalo de medida y están cercanos.

$$u(c) = \sqrt{\left(\frac{p_2 - p}{p_2 - p_1} \right)^2 u^2(c_1) + \left(\frac{p - p_1}{p_2 - p_1} \right)^2 u^2(c_2) + 2 \left(\frac{p_2 - p}{p_2 - p_1} \right) \left(\frac{p - p_1}{p_2 - p_1} \right) r(c_1, c_2) u(c_1) u(c_2)}$$

$$u(c) = \sqrt{\left[\left(\frac{p_2 - p}{p_2 - p_1} \right) u(c_1) + \left(\frac{p - p_1}{p_2 - p_1} \right) u(c_2) \right]^2}$$

Por lo tanto, la incertidumbre estándar del valor de interpolación corresponde a:

$$u(c) = \left(\frac{p_2 - p}{p_2 - p_1} \right) u(c_1) + \left(\frac{p - p_1}{p_2 - p_1} \right) u(c_2)$$



Como se puede observar la incertidumbre estándar $u(c)$ del valor de interpolación corresponde a la interpolación de las incertidumbres estándar $u(c_1), u(c_2)$

Por el contrario, si no se ha verificado el comportamiento lineal del patrón de medida, no es posible realizar interpolación lineal. En dicho caso no sería posible obtener un valor de corrección para un punto p y por lo tanto se tendría $c = 0$. La incertidumbre estándar $u(c)$ asumiría el error por dicha consideración y sería estimada de acuerdo con el numeral F.2.4.5 de (5), así:

$$u(c) = \frac{U_{max} + |c_{max}|}{\sqrt{3}}$$

Siendo $|c_{max}|$, el mayor valor absoluto de corrección de acuerdo con la información que se cuente en el respectivo intervalo de medición y U_{max} corresponde a la mayor incertidumbre expandida dentro de dicho intervalo de medición.

Para cualquier caso, es importante considerar también la componente por linealidad del patrón de medida. Esta se puede encontrar en el manual de fabricante. Cuando se utiliza la incertidumbre instrumental “especificaciones de fabricante” reportada en el respectivo manual de usuario, generalmente la componente por linealidad ya está incluida en dicha incertidumbre. Para esto es importante remitirse a la información dada por el fabricante del patrón de medida.

6.3 Incertidumbre por redondeo

En algunas ocasiones es necesario redondear resultados de medición para reportarlos de manera adecuada, sin embargo, dicho redondeo puede generar desviaciones o errores en los resultados de medida por no contemplar el redondeo en la incertidumbre a reportar.

Suponiendo que dos personas (A y B) toman datos en el proceso de calibración de un multímetro en el punto de 100 mV en tensión continua y quieren saber si los resultados son compatibles entre ellos. Cada uno de ellos obtienen las siguientes lecturas:

	Persona A		Persona B	
Obs. 1	100.00	mV	100.01	mV
Obs. 2	100.01	mV	100.01	mV
Obs. 3	100.00	mV	100.00	mV
Obs. 4	100.01	mV	100.01	mV
Obs. 5	100.00	mV	100.00	mV
Promedio	100.0040	mV	100.0060	mV

Como se observa, sólo una de las lecturas es diferente entre las dos personas, sin embargo, corresponde a la variación del equipo en una resolución, lo cual puede ser normal.

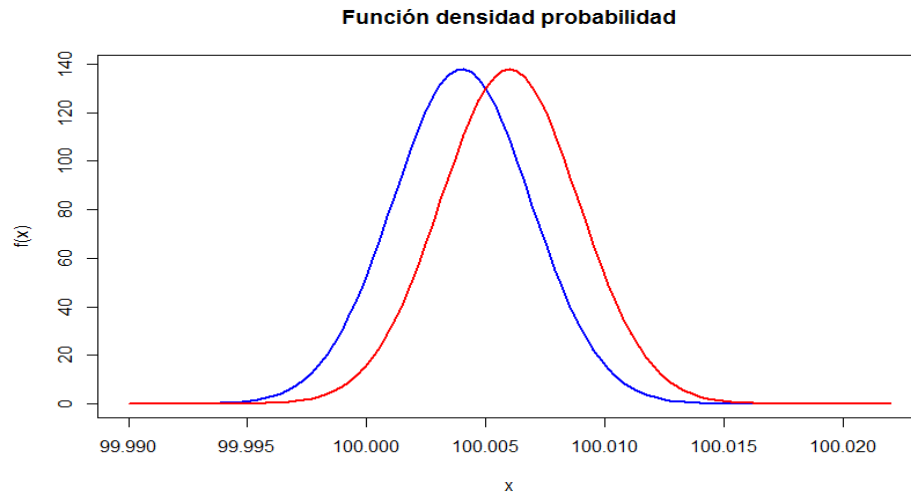
De acuerdo con el siguiente presupuesto de incertidumbre, la componente dominante es la incertidumbre por resolución:

Presupuesto incertidumbre Calibración Multímetro

Componente		Contribución
Incertidumbre instrumental (Especificaciones patrón)	0.000575 mV	2.9 %
Incertidumbre corrección patrón (Certificado)	0.000150 mV	0.2 %
Incertidumbre por resolución Multímetro	0.002887 mV	72.7 %
Incertidumbre por repetibilidad de las lecturas	0.001667 mV	24.2 %

Obteniendo finalmente una incertidumbre expandida de 0.0068 mV

A partir de la información de promedio e incertidumbre expandida obtenida por cada persona, a continuación, se presenta una gráfica comparativa de los resultados de medición como distribuciones normales.

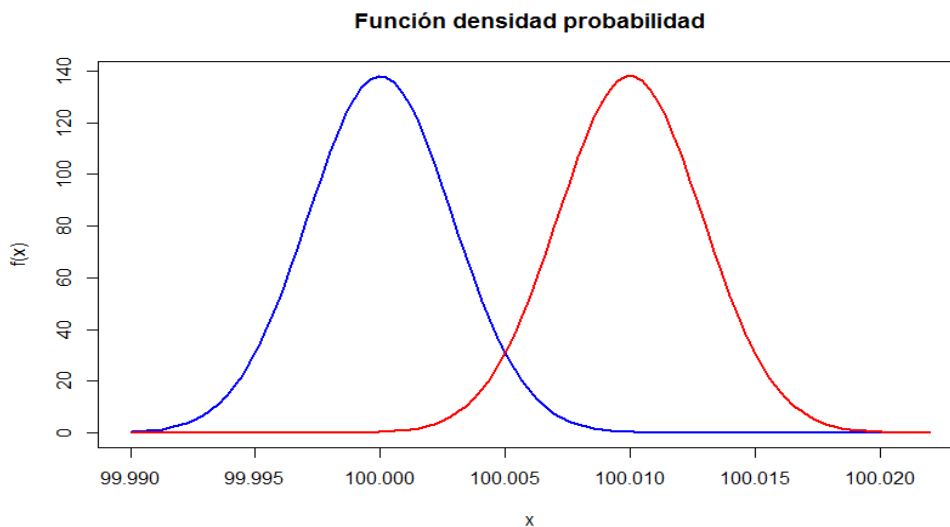


Es evidente la compatibilidad de los resultados, de hecho, empleando el error normalizado se obtiene $E_n = 0.21$, es decir resultados completamente compatibles.

De acuerdo con el numeral 5.2.2.4 de (6) se indica que la lectura del multímetro no debería reportarse con más cifras decimales que su resolución. Es decir, para el ejemplo, la resolución del multímetro bajo prueba es de 0.01 mV, por lo tanto, se tiene:

	Persona A		Persona B	
Promedio redondeado a los decimales de la resolución	100.00	mV	100.01	mV

Graficando los resultados redondeados nuevamente, con la incertidumbre expandida obtenida de 0.0068 mV, se tiene:



Se puede observar que los resultados entre las dos personas se alejaron debido al redondeo de los mismos y empleando el error normalizado se obtiene $E_n = 1.04$, es decir resultados no compatibles.

Realmente en este ejemplo los resultados son compatibles, pero no se está considerando una componente de incertidumbre por el redondeo realizado y por lo tanto se están reportando resultados erróneos.

A continuación, se presentan dos opciones para operar los resultados y evitar este tipo de errores por el redondeo de resultados:

- La primera opción, consiste en reportar la incertidumbre expandida, y por lo tanto los resultados de medición, con máximo el número de decimales de la resolución del multímetro.
- La segunda opción, consiste en adicionar a la incertidumbre expandida una componente por el redondeo efectuado.

A continuación, se muestra un procedimiento sugerido para tener en cuenta el redondeo de los resultados, en la incertidumbre expandida a reportar (segunda opción):

El redondeo que se efectúa a un resultado de medición puede verse como un ajuste que modifica el valor y que requiere una corrección para obtener el valor verdadero. Para efectos de contemplar una incertidumbre se sugiere utilizar una modificación del numeral F.2.4.5 de (5). Es decir, como no se realiza la corrección, se contempla dicha corrección c_{red} , en la incertidumbre expandida a reportar U , sumándola linealmente a la incertidumbre expandida obtenida previamente U_{prev} , así:

$$U = U_{prev} + |c_{red}|$$

La corrección $|c_{red}|$, se obtiene como el valor absoluto de la diferencia entre el valor redondeado y el valor sin redondear. Para el caso de la persona A del ejemplo, se tiene:

$$|c_{red}| = |100.00 \text{ mV} - 100.0040 \text{ mV}| = 0.0040 \text{ mV}$$

Teniendo en cuenta que la incertidumbre expandida que se había obtenido era 0.0068 mV, la incertidumbre expandida a reportar, considerando el redondeo, es:

$$U = 0.0068 \text{ mV} + 0.0040 \text{ mV} \approx 0.011 \text{ mV}$$



6.4 Reporte de resultados

La incertidumbre expandida se reporta con máximo dos cifras significativas y los resultados finales de medición deberían expresarse con la misma cantidad de decimales que su incertidumbre (ver numeral 7.2.6 de (5)), esto teniendo en cuenta que la incertidumbre es la que indica la información significativa del resultado de medición.

Para el reporte de resultados en la calibración de multímetros digitales, se puede tener la idea equivocada de reportar el error de medida con la cantidad de decimales de la resolución del multímetro, sin importar, por ejemplo, que la cantidad de decimales de la incertidumbre con dos cifras significativas sea menor que los decimales de la resolución. Reportar un error con menor cantidad de decimales que la resolución del multímetro no degrada dicha resolución, simplemente indica que los demás decimales no aportan información (no son significativos) para la incertidumbre que se está reportando. Las demás cifras decimales del error aportarían información para incertidumbres de medición más pequeñas.

Es decir, reportar un resultado de medición en la calibración de un multímetro, de la siguiente manera, porque la resolución del multímetro es 0.0001 V, es incorrecto:

Error		Incertidumbre Expandida	
0.0028	V	0.015	V

La forma correcta es:

Error		Incertidumbre Expandida	
0.003	V	0.015	V

El resultado se redondea al número de decimales de su incertidumbre.

7. INTERPRETACIÓN Y USO DE CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN

7.1 Interpretación de resultados en certificados de calibración

La información reportada en los certificados de calibración es muy importante, no solo los resultados de medición sino también la configuración utilizada en el equipo bajo prueba, las características de la medición, las condiciones ambientales, entre otras.

El patrón de medida debe utilizarse bajo las condiciones ambientales y modos de configuración indicados en el certificado de calibración. Si el instrumento es utilizado bajo condiciones distintas a las señaladas en el respectivo certificado de calibración, se deben realizar las correcciones necesarias. A continuación, algunos ejemplos:

- La calibración de una resistencia en una intensidad de corriente diferente a la de operación implica tener caracterizada la resistencia ante variaciones de intensidad de corriente o conocer los coeficientes de potencia, realizar las correcciones pertinentes de acuerdo con el modelo de medición y adicionar las respectivas componentes de incertidumbre asociadas. Lo mismo aplica cuando debe ser utilizada bajo una condición ambiental diferente a la reportada en el certificado de calibración o cualquier condición que afecte el valor de la resistencia. Esta información puede estar en los respectivos manuales de fabricante o requerir procesos de caracterización específicos.

- Hay multímetros digitales que presentan en sus manuales de usuario coeficientes de temperatura que afectan la incertidumbre instrumental “especificaciones de fabricante” cuando son utilizados en condiciones de temperatura ambiente por fuera de los límites establecidos en las especificaciones a partir de la temperatura ambiente de calibración.

Se recomienda realizar la calibración de los patrones de medida en los modos de operación y configuración que garanticen sus mejores incertidumbres instrumentales.

7.2 Aplicación de correcciones

Sin importar si un patrón de medida se encuentra dentro de los límites de error máximo permitido, se sugiere siempre realizar corrección de sus valores a partir de los resultados registrados en el respectivo certificado de calibración.

Un certificado puede indicar el error de medida o la corrección con su respectiva incertidumbre expandida para cierta probabilidad de cobertura.

El error de medida corresponde a la diferencia entre el valor medido de una magnitud y el valor de referencia (1). Se debe tener cuidado con la definición, ya que valor medido se refiere al valor atribuido al mensurando, es decir el valor de la magnitud objeto de medición (valor del instrumento bajo prueba), sin importar si el instrumento bajo calibración tiene la función de medición o de generación.

Por ejemplo, en la calibración de un multímetro digital utilizando como patrón de medida un calibrador multifunción, el error de medida a reportar corresponde a la diferencia entre el valor medido con el multímetro menos el valor de referencia obtenido con el calibrador multifunción. En la calibración de un calibrador multifunción utilizando como patrón de medida un multímetro digital, el error de medida a reportar corresponde a la diferencia entre el valor indicado por el calibrador multifunción y el valor obtenido a partir de las mediciones con el multímetro patrón.

La corrección es la compensación de un efecto sistemático estimado (1). La compensación del valor de un patrón de medida a partir de los resultados de medida reportados en su certificado de calibración corresponde a la diferencia entre la indicación del patrón de medida y su respectivo error de medida.

Por ejemplo, suponiendo que, para una fuente de tensión eléctrica continua, el certificado de calibración reporta los siguientes resultados de medida:

Valor indicado instrumento de prueba	Valor patrón	Error	Factor de cobertura	Incertidumbre expandida <i>U</i>
V	V	V	<i>k</i> para 95.45%	V
0.100	0.098949	0.001051	2.0	0.000014
0.250	0.247981	0.002019	2.0	0.000017
0.500	0.499327	0.000673	2.0	0.000024
0.750	0.749049	0.000951	2.0	0.000032
1.000	0.998884	0.001116	2.0	0.000040
5.000	5.00071	-0.00071	2.0	0.00021

Es decir, cuando se utilice la fuente en 1 V, se debe restar a dicho valor, su respectivo error de medida, correspondiente a 0.001116 V, así obtengo el valor verdadero generado correspondiente a 0.998884 V. La corrección, en este caso, es -0.001116 V. Si el certificado de calibración reportara la

corrección en lugar del error de medida, el valor verdadero generado por la fuente, corresponde a la suma de la indicación con su respectiva corrección.

8. ERRORES COMUNES EN MEDICIONES DE MAGNITUDES ELÉCTRICAS Y TÉCNICAS PARA MITIGAR SU EFECTO SOBRE LOS RESULTADOS DE MEDIDA

Existe una alta probabilidad de cometer errores en las mediciones de magnitudes eléctricas por desconocimiento del comportamiento físico de las magnitudes de entrada, las características de los patrones de medida o la influencia de los cables de conexión en los sistemas de medida. Para realizar mediciones trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI), garantizando su calidad y compatibilidad, no simplemente se debe garantizar la calibración de los patrones de medida, sino que implica tener un conocimiento lo más amplio posible del sistema de medición para realizar las correcciones adecuadas y controlar las afectaciones que pueda tener. Reducir la incertidumbre de medida, implica tener un sistema de medida más controlado y conocer muchos más detalles de la medición. A continuación, se describen algunos errores comunes que se pueden presentar en mediciones de magnitudes eléctricas y la forma de mitigarlos:

8.1 Configuraciones y correcciones para la medición de resistencia eléctrica a 2 hilos

Para la medición de bajos valores y hasta cierto punto valores intermedios (7) de resistencia eléctrica, es importante medir a cuatro hilos, ya que la resistencia de los cables de conexión afecta las mediciones, el impacto también depende de la exactitud de la medición. Sin embargo, hay multímetros que únicamente tienen la función para medir a dos hilos, en estos casos, si no se realizan los ajustes o configuraciones adecuadas en los equipos, se pueden generar desviaciones importantes en los resultados de medición. Para medición de valores de resistencia eléctrica a dos hilos es importante eliminar la resistencia aportada por los cables de conexión, que puede llevarse a cabo, empleando alguna de las siguientes formas:

- Ajuste de cero: Consiste en realizar la medición de la resistencia eléctrica de los cables de conexión y con dicho valor, realizar el ajuste del instrumento de medida o la corrección del resultado de medición.
- Utilizar las funcionalidades de los patrones de medida: Hay calibradores multifunción que permiten generar valores de resistencia eléctrica a dos hilos utilizando la funcionalidad de conectar dos hilos adicionales para realizar la respectiva corrección del valor generado por la resistencia de los cables de conexión. El usuario debe identificar en el manual de fabricante, si el patrón de medida utilizado cuenta con dichas funcionalidades y cómo es su correcta forma de configuración.

Se debe utilizar sólo una de las formas para corregir el resultado de medición por los cables de conexión, ya que si las dos son empleadas en la misma medición se estaría corrigiendo dos veces la resistencia eléctrica de los cables de conexión y también se tendrían mediciones erróneas.

8.2 FEM termoelectricas

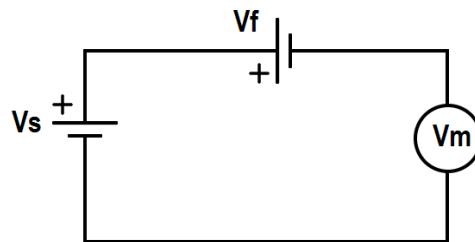
La FEM térmica es la fuerza electromotriz generada por la unión de dos materiales conductores diferentes, en presencia de un gradiente de temperatura.

Las FEM térmicas pueden generar errores significativos en la medición de bajas tensiones eléctricas y por lo tanto se deben mitigar de la siguiente manera:

- Limpiar los bornes y las puntas de conexión adecuadamente

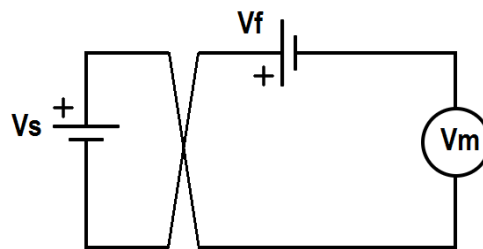
- En lo posible hacer conexiones con los mismos materiales
- Evitar los gradientes de temperatura. Después de realizar las conexiones esperar a que la temperatura del ambiente se estabilice y que el sistema alcance la estabilidad térmica, ya que la manipulación calienta los contactos.
- Evitar las fuentes de calor y corrientes de aire

Además de lo anterior, las FEM térmicas remanentes que se consideran constantes, se pueden corregir haciendo mediciones a izquierda y a derecha (8), esto significa realizar conmutación de los terminales en la fuente y al realizar el promedio de los valores absolutos se elimina el aporte sistemático de la FEM térmica a la medición. Supongamos que queremos medir una tensión eléctrica V_S pero tenemos una FEM térmica V_f en el circuito de medición, así:



Por lo tanto, el valor de tensión medido será $V_m = V_S - V_f$, es decir se tendrá un error adicional debido a la FEM térmica del circuito V_f

La medición que se realizó se llamará medida a derecha V_{m+} , ahora conmutando los cables de conexión en la fuente de tensión eléctrica V_S se repite la medida. Esta última medición se llamará medida a izquierda V_{m-} , así:



Obteniendo un valor medido de $V_{m-} = -V_S - V_f$

Matemáticamente se puede obtener el valor medido V_m de la fuente V_S sin la componente V_f (desconocida y considerada constante), operando las mediciones a derecha y a izquierda, así:

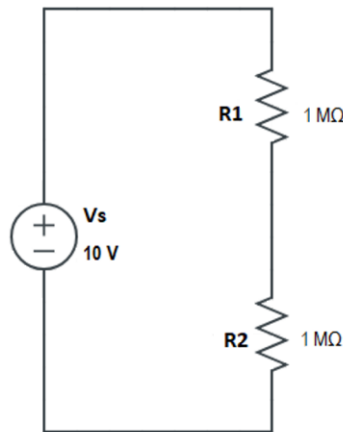
$$V_m = \frac{V_{m+} - V_{m-}}{2} = \frac{(V_S - V_f) - (-V_S - V_f)}{2} = \frac{2V_S}{2} = V_S$$

Lo mejor es utilizar conectores y cables del mismo material con el fin de reducir los efectos de las FEM térmicas. Se debe utilizar cable trenzado y apantallado para minimizar el ruido eléctrico debido a interferencia electromagnética, adicionalmente, el par trenzado reduce la inducción de tensión eléctrica.

8.3 Impedancia de entrada de multímetros

Cualquier variable o elemento que se agregue a un sistema de medición afecta los resultados de medición, incluso el hecho de incluir el patrón de medida para realizar las mediciones puede afectar el valor atribuido al mensurando.

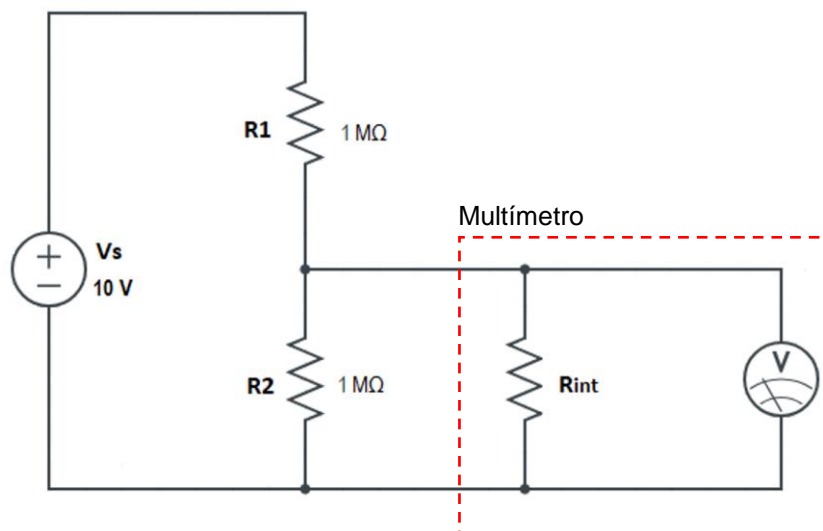
Los multímetros en su función de medición de tensión eléctrica continua, idealmente se consideran con impedancias de entrada que tienden a un valor infinito, sin embargo, en la realidad esto no es cierto. Supongamos un circuito conformado por una fuente de tensión eléctrica V_s de 10 V y dos resistencias en serie R_1, R_2 con valor nominal $1\text{ M}\Omega$, como se muestra a continuación:



Se desea realizar la medición de tensión eléctrica sobre una de las resistencias V_{R_2} , idealmente debería ser 5 V, teniendo en cuenta que corresponde a un divisor de tensión con dos resistencias iguales:

$$V_{R_2} = \frac{V_s R_2}{R_1 + R_2} = \frac{V_s}{2} = 5\text{ V}$$

Sin embargo, considerando la impedancia interna del multímetro R_{int} como $10\text{ M}\Omega$ (valor típico en multímetros de características industriales), el circuito completo y real quedaría representado de la siguiente manera:



Teniendo en cuenta la impedancia interna del multímetro se tiene una resistencia equivalente al paralelo entre R_2 y R_{int} y la medición de tensión eléctrica sobre la resistencia V_{R2} , realmente sería:

$$V_{R2} = \frac{V_s \frac{R_2 R_{int}}{R_2 + R_{int}}}{R_1 + \frac{R_2 R_{int}}{R_2 + R_{int}}} \approx 4.76190 V$$

Es decir, se está cometiendo un error alrededor de 4.8 % debido al efecto de la impedancia de entrada del medidor sobre el sistema a medir. Un error que, si no se corrige o mitiga, generará resultados incorrectos que no son atribuibles ni al mensurando ni al patrón de medida sino a la interacción de los elementos del sistema de medición. Un multímetro de mejores características metrológicas puede tener una impedancia de entrada R_{int} mayor a 10 GΩ, obteniendo errores menores a 0.005 %, debido a la impedancia de entrada del medidor, para la medición descrita.

De acuerdo con lo anterior se reafirma la importancia de conocer en detalle el sistema de medición y las variables que lo pueden afectar, seleccionar adecuadamente los instrumentos de medida de acuerdo con el mensurando y su interacción con el sistema de medición para garantizar mediciones correctas y de calidad.

9. PATRONES DE MEDIDA EN MAGNITUDES ELÉCTRICAS

9.1 Selección de patrones de medida en magnitudes eléctricas

Los patrones de medida deben ser seleccionados de acuerdo con el alcance de las mediciones y la incertidumbre objetivo a reportar. Entre mayor alcance esperado o incertidumbres más pequeñas, los patrones de medida deberán tener mejores características metrológicas, mayores requerimientos para su uso y respectivas comprobaciones intermedias, adecuaciones específicas de instalaciones y condiciones ambientales, mayor competencia del personal técnico, requisitos de trazabilidad más exigentes y por lo tanto mayor costo tanto en los patrones de medida como en su mantenimiento.

La selección de los patrones de medida es muy importante, implica un análisis detallado de las mediciones que se quieren realizar, pero también requiere de un balance óptimo entre la componente técnica y la componente de recursos. No siempre, la selección de patrones de medida con las mejores características metrológicas que se puedan conseguir, va a ser una buena opción.

Ejemplo de selección:

Suponiendo que un laboratorio quiere prestar el servicio de calibración de multímetros digitales hasta 4 ½ dígitos. Para la calibración de este tipo de multímetros, bastaría con emplear el método de comparación directa y el patrón de medida sería un calibrador multifunción que abarque las distintas magnitudes eléctricas. Sin embargo, hay calibradores de diferentes características metrológicas y por lo tanto distintos costos.

Seleccionar el calibrador multifunción de mejores características metrológicas puede ser una opción para un laboratorio que tiene recursos suficientes para invertir en dicho patrón de medida, pero se debe tener presente que los mayores costos no son únicamente en la inversión inicial, sino que puede implicar mayores costos en mantenimiento, acondicionamiento y trazabilidad para el uso de dicho patrón. Podría pensarse que un laboratorio que tenga un mejor patrón de medida reportará mejores incertidumbres en la calibración de un mismo equipo, sin embargo, esto no siempre es así.

De acuerdo con el siguiente presupuesto de incertidumbre, la componente dominante es la incertidumbre por resolución:

Presupuesto incertidumbre Calibración Multímetro		
Componente		Contribución
Incertidumbre instrumental (Especificaciones patrón)	0.000575 mV	2.9 %
Incertidumbre corrección patrón (Certificado)	0.000150 mV	0.2 %
Incertidumbre por resolución Multímetro	0.002887 mV	72.7 %
Incertidumbre por repetibilidad de las lecturas	0.001667 mV	24.2 %

Se obtiene finalmente una incertidumbre expandida de 0.0068 mV para una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95 %. Suponiendo que se reemplaza el patrón de medida por uno mucho mejor cuya incertidumbre instrumental sea la mitad, se obtendrá una incertidumbre expandida de 0.0067 mV para una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95 %. Es decir, aunque la incertidumbre instrumental se redujo a la mitad, la incertidumbre expandida a reportar es muy similar en los dos casos, porque la incertidumbre dominante corresponde a una componente que depende del equipo bajo prueba y no del patrón de medida.

Por otro lado, emplear un patrón de medida con incertidumbres instrumentales “especificaciones de fabricante” muy buenas respecto al equipo bajo prueba puede resultar en que se deban tomar mucha más cantidad de observaciones repetidas para garantizar un factor de cobertura igual a 2 (para un 95.45 % de probabilidad de cobertura), ya que dependiendo la dispersión de las observaciones la incertidumbre tipo A puede ser dominante.

Este ejemplo permite evidenciar que no siempre escoger el patrón de medida con mejores incertidumbres instrumentales es la mejor opción tanto desde el punto de vista de costos, como desde el punto de vista técnico. De aquí la importancia de una selección adecuada de acuerdo con los requisitos metrológicos identificados.

Una opción para seleccionar los patrones de medida es que la relación entre la especificación del equipo bajo prueba y la incertidumbre a reportar sea de por lo menos cuatro a uno (4:1) (numeral 4.4 de (6)). Esto, para tener una referencia y no siempre debería definirse así; de hecho, en varios casos, dependiendo el instrumento o el mensurando, esta relación no es posible.

9.2 Características de los patrones de medida e influencia en los sistemas de medición

Como se ha definido en algunos apartados de esta guía, varias de las características, funciones y configuraciones de los patrones de medida en magnitudes eléctricas influyen en los resultados de medición y así como permiten mediciones más confiables o correcciones necesarias, su uso inadecuado o desconocimiento puede generar resultados de medición incorrectos o imposibilidad para realizar ciertas mediciones. Algunas de estas características son:

- Impedancia de entrada
- Funciones de compensación de cables de conexión
- Configuraciones (resolución, NPLC (Number of Power Line Cycles), velocidad, entre otros)
- Ajustes de cero
- Funciones de autodiagnóstico
- Tensión disponible “compliance voltage”



- Compensación de cargas inductivas
- Configuración de filtros
- Entre otras características

La información referente a las características de los patrones de medida en magnitudes eléctricas debe ser consultada en los respectivos manuales de fabricante, en los cuales se indica su correcta configuración y los casos en los cuales es pertinente su utilización.

10. RECOMENDACIONES PARA LAS INSTALACIONES Y EL CONTROL DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES

Las especificaciones para las condiciones ambientales del Laboratorio dependen de las magnitudes a medir, los equipos utilizados y la incertidumbre requerida. Por ejemplo, algunas consideraciones importantes en laboratorios de calibración de magnitudes eléctricas son la calidad del suministro eléctrico, las tierras, los campos electromagnéticos, la temperatura ambiente, la humedad relativa, la presión atmosférica, entre otras.

Respecto a la temperatura, la recomendación de acuerdo con (9) para laboratorios que realizan calibración de equipos en magnitudes eléctricas es $23\text{ °C} \pm 1.5\text{ °C}$, sin embargo, si el laboratorio únicamente calibra equipos de mano con un calibrador multifunción, se podría trabajar adecuadamente con un control de temperatura de $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ como se menciona en (10).

Los límites aceptables de humedad relativa podrían estar en $45\% \pm 15\%$, sin embargo, estos límites podrían ser más amplios de acuerdo con los equipos utilizados. La humedad es una magnitud muy importante en la medición de algunos valores de magnitudes eléctricas, por ejemplo, para altos valores de resistencia. Una baja humedad del ambiente permite la generación de cargas estáticas, sin embargo, una humedad alta influye en que se presenten corrientes de fuga.

Hay condiciones ambientales que afectan los sistemas de medición, pero que no son fácilmente controlables, en estos casos es necesario tener caracterizado el sistema de medición y aplicar las correcciones pertinentes. Por ejemplo, se ha evidenciado que la presión atmosférica puede afectar el valor de algunas resistencias patrón y el valor generado por referencias de tensión continua basadas en el diodo Zener (11) (12).

Los patrones y las mediciones que se realizan en los laboratorios de magnitudes eléctricas pueden ser susceptibles a la energía de los campos electromagnéticos en el área donde se realizan las mediciones se espera que el promedio de la intensidad de campo sea menor a $100\text{ }\mu\text{V/m}$ en el espectro de la interferencia por radiofrecuencia (9) (10).

La regulación o estabilización de la tensión (definida como la estabilidad de la tensión de alimentación con una condición de carga aproximadamente constante) no debe subestimarse al realizar mediciones en los laboratorios de calibración. Se puede perder mucho tiempo en la repetición de mediciones que no son satisfactorias debido a una tensión variable en la fuente de alimentación. Además, se pueden realizar mediciones erróneas si la tensión de la fuente de alimentación supera ciertos límites operativos. En general, los patrones e instrumentos de medición de los laboratorios tienen reguladores de tensión incorporados y su funcionamiento es relativamente independiente de la tensión de la fuente de alimentación dentro de los límites de variación de $\pm 10\%$ (9).

Valores menores a $5\text{ }\Omega$ pueden considerarse aceptables para la resistencia de puesta a tierra de la línea de alimentación de energía en laboratorios de calibración (9).



Es importante identificar todas las condiciones y parámetros que permitan el adecuado desempeño de los patrones, equipos y la calidad de las mediciones de acuerdo con las necesidades de calibración (magnitud, intervalo de medición e incertidumbre), ya que estos repercuten sobre la infraestructura e instalaciones del laboratorio.

11. CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA MEDIDAS EN MAGNITUDES ELÉCTRICAS

A continuación, se presentan algunas recomendaciones para la medición adecuada de magnitudes eléctricas, pueden existir muchos más factores que se deben tener en cuenta de acuerdo con la magnitud, los valores y la incertidumbre requerida. En general para las mediciones eléctricas se deben usar los cables adecuados de conexión y deben estar en condiciones óptimas para su uso, se recomienda verificar siempre la continuidad de los cables de medición.

11.1 Tensión eléctrica continua e intensidad de corriente eléctrica continua

Para mediciones de tensión continua e intensidad de corriente eléctrica continua, previamente se realiza ajuste de cero en el respectivo intervalo del medidor. Para tensión continua, se hace un corto de baja FEM térmica y se ejecuta el ajuste de cero. Para corriente continua, el cero se ajusta con los bornes abiertos.

En general mantenga los cables entorchados por pares, para reducir el área de los bucles entre ellos, ya que separar los cables y crear bucles en el circuito puede generar perturbaciones. Además, se debe tener cuidado con problemas de fugas de corriente ocasionados por aislantes inadecuados, impurezas de los materiales o desgaste entre el aislante y el conductor en los cables de medición.

Las FEM térmicas son el mayor problema en medición de pequeños niveles de tensión continua. Siempre que sea posible utilice cables de medición cortos, en lo posible utilizar conectores, bornes y cables de conexión del mismo material y asegurar un bajo gradiente térmico (13).

11.2 Tensión eléctrica alterna e intensidad de corriente eléctrica alterna

El factor más significativo en las mediciones en intensidad de corriente eléctrica alterna es el efecto de la capacitancia del cable en las mediciones (13). De esta manera es importante mantener la capacitancia del cable lo más baja posible. El uso de cable de par trenzado con apantallamiento y conectores de baja FEM térmica son la mejor opción para mediciones en tensión e intensidad de corriente eléctrica alterna. Para tensión eléctrica alterna la longitud de los cables debe ser tan corta como sea posible (14).

Se debe tener cuidado con las interferencias electromagnéticas generadas por fuentes de campos electromagnéticos en los alrededores del sistema de medición, algunas fuentes de estos fenómenos son: iluminación fluorescente, inadecuado apantallamiento, transitorios de interruptores locales, inducción y radiación por transmisores locales de ondas electromagnéticas, tensiones excesivas de modo común entre fuentes y cargas. Además, las perturbaciones pueden ser amplificadas por la capacitancia de las manos de los operadores, este fenómeno tiene un efecto considerable en circuitos con alta impedancia.

11.3 Resistencia eléctrica

Para mediciones de resistencia eléctrica, se hace ajuste de cero inicialmente en el respectivo intervalo de medición. En el caso de medición de resistencia a dos hilos, se debe realizar compensación de la resistencia de los cables de medición. Deben seguirse los procedimientos para el ajuste de cero que se indiquen en los manuales de fabricante de los equipos.



Para realizar mediciones de bajos e intermedios valores de resistencia eléctrica, aproximadamente hasta 100 k Ω , esto depende de la exactitud de las mediciones, hay varios aspectos importantes:

La resistencia de los cables de conexión se encuentra en serie con el elemento resistivo que se desea medir, por tanto, es recomendable usar cables cortos y gruesos, ya que la resistencia depende de la longitud y la sección transversal del conductor, además de realizar las correcciones necesarias por los cables de conexión y las condiciones de medición. En lo posible la medición de bajos e intermedios valores de resistencia eléctrica se debe realizar a cuatro hilos.

Otro aspecto importante es la resistencia de contacto, estas pueden tener valores que van desde las décimas de miliohm hasta un ohm dependiendo del tipo de contacto, con un conector de horquilla (spade lug) bien apretado, se pueden presentar valores de décimas de miliohm, para conectores de banana pueden llegar a décimas de ohm, para un relé mecánico puede llegar aproximadamente a un ohm (10). Estos valores también se pueden dar por contaminación de la superficie de los contactos, para evitar esto se recomienda limpiar estas superficies con alcohol isopropílico o etanol, usar mediciones a cuatro terminales y por supuesto usar los conectores apropiados según la exactitud de la medición.

Para realizar mediciones de altos valores de resistencia eléctrica (7) hay varios aspectos importantes:

Los cables de medición deben tener una resistencia de aislamiento muy grande, por ejemplo, aquellos cuyo material aislante es Teflón (15) (13), esto para disminuir la generación de corrientes de fuga. Cuando no es posible tener cables cuyas líneas tengan un muy buen aislante entre ellas, se deben separar la mayor distancia posible y de esta manera se logra un mejor resultado de medición.

En altos valores de resistencia los tiempos de estabilización de las mediciones es mayor debido al efecto de absorción dieléctrica (10) (16). Es importante seleccionar adecuadamente estos tiempos para realizar mediciones confiables.

Cuando se miden valores altos de resistencia, la humedad se convierte en una magnitud de gran influencia debido a las corrientes de fuga que se puede generar en el circuito de medición (16), el mayor impacto se evidencia en las humedades altas, mayores a 45 %HR, aunque en humedades bajas también se presentan variaciones, la menor variación se presenta alrededor del 40 %HR (17).

11.4 Guardas y tierras

En los laboratorios de calibración saber interconectar los instrumentos en un proceso de medición es muy importante para poder obtener resultados adecuados en los patrones de mejor exactitud.

Los instrumentos que reciben su energía de la red de alimentación AC tienen un acoplamiento entre la fuente de la línea de tensión y el circuito activo del instrumento, lo que puede generar errores y dispersión en los resultados de medición. Por otro lado, la interferencia electromagnética generada por campos eléctricos y magnéticos también puede generar inestabilidad en las mediciones. El efecto de estos fenómenos puede ser reducido por varias técnicas, pero eliminarlo completamente es complejo, costoso y puede ser innecesario. A continuación se presentan algunas recomendaciones básicas para su tratamiento y prevención.

La guarda es un blindaje de Faraday o un blindaje de campo eléctrico que se encuentra alrededor de los circuitos analógicos y está eléctricamente aislada de la tierra y del chasis del patrón (32-10) de (10). Esta guarda proporciona una trayectoria de baja impedancia para el ruido del modo común y las corrientes de tierra. La guarda desvía las corrientes hacia la tierra del instrumento causada por la conexión del cable de la línea de alimentación a la entrada del instrumento que genera una diferencia



de potencial de tierra con los chasis de los instrumentos interconectados. Además de ser un blindaje de campo eléctrico, proporciona también un camino a tierra para las corrientes generadas por el modo común, con esto se evitan errores en las mediciones.

La guarda de un instrumento de medición puede ser usada para reducir los errores de modo común, como también para proporcionar un aislamiento del campo eléctrico. Para esto debe ser conectada al LO de los terminales de la fuente (10).

Las corrientes de tierra se presentan si las guardas de los instrumentos no están conectadas apropiadamente, generando errores en la medición. La regla básica es, en un sistema de medición las guardas de todos los instrumentos deben estar conectadas al mismo punto.

En resumen, la guarda se debe usar en las siguientes condiciones (18):

- Cuando exista una diferencia de potencial entre el equipo y la tierra de la red eléctrica.
- Cuando se usan cables largos para conectar cargas de alta impedancia.
- Cuando el equipo se usa en un medio con alto nivel de ruido electromagnético.
- Para evitar los efectos de la carga electrostática de las personas.

También se deben tener en cuenta las siguientes prácticas (10):

- Todos los equipos del sistema de medición que se conecta a la red de alimentación eléctrica, deben estar conectados al mismo punto de tierra.
- Siempre que sea posible conecte las guardas. No deje el circuito abierto. En el caso de los multímetros es particularmente importante conectar apropiadamente la guarda ya que se puede generar una tensión excesiva y peligrosa entre el terminal LO y el terminal GUARD.
- Se debe tener en cuenta que la conexión de tierra en el circuito de medición se realiza únicamente en un punto, esto para evitar lazos de tierra y por lo tanto errores en las mediciones.

Cada patrón de medida en magnitudes eléctricas tiene características particulares tanto en sus posibilidades de conexión, protección y configuración, por lo tanto, es importante consultar los respectivos manuales de usuario y acoger sus recomendaciones e indicaciones.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **JCGM 200:2012.** *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. 3rd 2008 version with minor corrections. s.l. : BIPM, 2012.
2. **CEM (Centro Español de Metrología).** *Procedimiento EL-001 para la calibración de multímetros digitales*. Madrid - España : CEM, 2008.
3. —. *Procedimiento EL-010 para la calibración de calibradores multifunción*. Madrid -España : CEM, 2008.
4. **IEC.** *Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary. International Electrotechnical Commission*. [Online] 2020. [Cited: 04 06, 2020.] <http://www.electropedia.org/>. 313-09-04.
5. **JCGM 100:2008.** *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement: GUM 1995 with minor corrections*. First. s.l. : BIPM, 1995. JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections. .



6. **EURAMET- Technical Committee for Electricity and Magnetism.** *Guidelines On the calibration of Digital multimeters. EURAMET cg-15. Version 3.0* . Braunschweig- Germany : s.n., 2015. Version 3.0.
7. **BIPM.** KCDB Classification of Services Electricity and Magnetism. *Version No. 9*. [Online] 06 04, 2020. [Cited: 01 18, 2021.]
https://www.bipm.org/utis/common/pdf/KCDB_2.0/CMC_services/EM_services.pdf.
8. *Designs for surveillance of the volt maintained by small group of saturated standard cells.* **W. G. Eike; J. M. Cameron.** 1985, Precision Measurement and Calibration, pp. 293-311.
9. **ISA.** *Recommended Enviroments for Standard Laboratories.* 2006. ISA-TR52.00.01-2006.
10. **Fluke Corporation.** *Calibration: Philosophy in Practice.* Second Edition. 1994.
11. *Temperature and Pressure Coefficients of Resistance for Thomas 1 ohm Resistors.* **Jones, George R and Elmquist, Randolph E.** 2, Gaitherburg- USA : s.n., junio 2007, Measure, Vol. 2 No.2, p. 42.
12. *Complete characterization of Zener standards at 10 V for measurement assurance program (MAP).* **Tang, Yi-hua.** 2, USA : s.n., Abril 2001, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 50, pp. 263-266.
13. **Fluke Corporation .** *How cables and connectors impact measurement uncertainty.* 2005.
14. **INTI.** *Procedimiento específico: PEE51, Calibración de Multímetros Digitales de Alta Exactitud.* Agosto 2012.
15. *Aspectos técnicos relevantes en la medición de valores de resistencia mayores a 1 MΩ.* **Márquez, Felipe Hernández.** s.l. : CENAM, 2007, Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica.
16. **HIOKI Corporation.** *Technical Note, Introduction to Resistance Measurement.* Vol. 1.
17. *Behaviour of high value standard resistors versus relative humidity: first experimental results.* **Galliana, F, Capra, P.P and Gasparotto, E.** Lisbon-Portugal : s.n., September 2001, 11th IMEKO TC-4 Symp. - Trends in Electrical Measurement and Instrumentation, pp. 48-51.
18. **FLUKE.** *Instruction manual 732B/734A DC Reference Standard.* Everett : Fluke Corporation, 2012. pp. 3-15.

Instituto Nacional de Metrología de Colombia - INM
Subdirección de Metrología Física, Red Colombiana de Metrología.
Av. Cra 50 No 26-55 Int. 2 CAN - Bogotá, D.C. Colombia
Conmutador: (571) 254 22 22
E-mail: contacto@inm.gov.co
www.inm.gov.co
www.rcm.gov.co

Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC
Av. Calle 26 # 57 – 83, Torre 8, Oficina 1001 - Bogotá, D.C. Colombia
PBX: +571 742 7592
E-mail: onac@onac.org.co
www.onac.org.co

