



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO PARA CONTROL DEL PATRÓN PRIMARIO DE TENSIÓN DC, MANTENIDO POR  
UN GRUPO DE CELDAS SATURADAS EN EL LABORATORIO DE METROLOGÍA DEL CII-  
USAC**

**Max Alexander Chalí Izquierdo**

Asesorado por el Ing. Ramiro Augusto Santizo González

Guatemala, marzo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO PARA CONTROL DEL PATRÓN PRIMARIO DE TENSIÓN DC, MANTENIDO POR  
UN GRUPO DE CELDAS SATURADAS EN EL LABORATORIO DE METROLOGÍA DEL CII-  
USAC**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MAX ALEXANDER CHALÍ IZQUIERDO**

ASESORADO POR EL ING. RAMIRO AUGUSTO SANTIZO GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

GUATEMALA, MARZO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
EXAMINADOR	Ing. Natanael Jonathan Requena Gómez
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

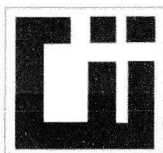
## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO PARA CONTROL DEL PATRÓN PRIMARIO DE TENSIÓN DC, MANTENIDO POR UN GRUPO DE CELDAS SATURADAS EN EL LABORATORIO DE METROLOGÍA DEL CII-USAC**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 24 de enero de 2021.

**Max Alexander Chalí Izquierdo**



Guatemala 15 de Octubre de 2021

Ingeniero Kenneth Issur Estrada Ruiz  
Supervisor de EPS  
Facultad de Ingeniería, USAC  
Ciudad Universitaria, Guatemala

Por este medio le envié un cordial saludo. y hago de su conocimiento que el estudiante MAX ALEXANDER CHALI IZQUIERDO, de la carrera de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, quien se identifica con CUI: 1727003450101 y Registro Académico: 200112894 finalizo con las actividades que le fueron asignadas en el Proyecto de EPS "DISEÑO PARA CONTROL DEL PATRÓN PRIMARIO DE TENSIÓN DC, MANTENIDO POR UN GRUPO DE CELDAS SATURADAS EN EL LABORATORIO DE METROLOGÍA DEL CII-USAC", las cuales realizo desde el inicio del EPS el 12 de septiembre de 2019 al 14 de julio de 2021. Así mismo el estudiante entregó a esta dependencia lo siguiente:

- Registros y procedimientos para transferencia trazabilidad en los patrones de tensión eléctrica.
- Diagnóstico de equipo patrón de tensión eléctrica.
- Procedimiento para cálculo de incertidumbre usando técnicas de medición de relación de multímetro digital
- Procedimiento para el mantenimiento de la unidad de tensión.

Dicho proyecto contiene, procedimientos, formatos y análisis financiero.

Por lo anterior extendiendo el presente FINIQUITO. Agradeciendo su colaboración y apoyo a esta entidad. Sin otro particular me suscribo.

Atentamente,

(f) Ing. Ramiro Augusto Santizo González  
Jefe del laboratorio  
Laboratorio de Metrología

Universidad de San Carlos de  
Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Unidad de EPS

Guatemala, 19 de noviembre de 2021.  
REF.EPS.DOC.481.11.2021.

Ing. Oscar Argueta Hernández  
Director Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Argueta Hernández.

Por este medio atentamente le informo que como Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Max Alexander Chali Izquierdo** de la Carrera de Ingeniería Electrónica, Registro Académico No. **200112894** y CUI **1727 00345 0101**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“DISEÑO PARA CONTROL DEL PATRÓN PRIMARIO DE TENSION DC, MANTENIDO POR UN GRUPO DE CELDAS SATURADAS EN EL LABORATORIO DE METROLOGÍA DEL CII-USAC”**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz  
ASESOR - SUPERVISOR DE EPS  
Unidad de Prácticas de Ingeniería y EPS  
Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz  
Supervisor de EPS  
Área de Ingeniería Eléctrica

c.c. Archivo  
KIER/ra

Universidad de San Carlos de  
Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Unidad de EPS

Guatemala 19 de noviembre de 2021.  
REF.EPS.D.260.11.2021.

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Presente

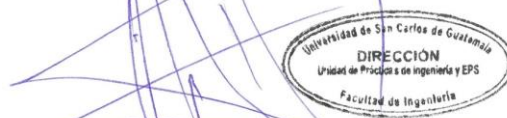
Estimado Ingeniero Rivera Carrillo.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"DISEÑO PARA CONTROL DEL PATRÓN PRIMARIO DE TENSION DC, MANTENIDO POR UN GRUPO DE CELDAS SATURADAS EN EL LABORATORIO DE METROLOGÍA DEL CII-USAC"** que fue desarrollado por el estudiante universitario, **Max Alexander Chali Izquierdo**, quien fue debidamente asesorado por el Ing. Ramiro Augusto Santizo Gonzalez y supervisado por el Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor y del Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,  
"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Oscar Argueta Hernández  
Director Unidad de EPS

/ra



REF. EIME 03. 2022.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; MAX ALEXANDER CHALÍ IZQUIERDO titulado: DISEÑO PARA CONTROL DEL PATRÓN PRIMARIO DE TENSION DC, MANTENIDO POR UN GRUPO DE CELDAS SATURADAS EN EL LABORATORIO DE METROLOGÍA DEL CII-USAC, procede a la autorización del mismo.

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo



GUATEMALA, 2 DE FEBRERO 2,022.



LNG.DECANATO.OI.213.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO PARA CONTROL DEL PATRÓN PRIMARIO DE TENSION DC, MANTENIDO POR UN GRUPO DE CELDAS SATURADAS EN EL LABORATORIO DE METROLOGÍA DEL CII-USAC**, presentado por: **Max Alexander Chalí Izquierdo**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ingra. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, marzo de 2022

AACE/gaoc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por darme tantas bendiciones en la vida, entre ellas la de ser padre y también poder concluir la carrera.
<b>Mis padres</b>	María del Rosario Izquierdo Vela y Maximiliano Adolfo Chali (q. e. p. d.). Por su sacrificio y esfuerzo, gracias a ellos he alcanzado este logro.
<b>Mi esposa</b>	Lygia María Esperanza Monzón Ávila. Por todo su apoyo y darme la bendición de ser padre.
<b>Mi hijo</b>	Lucas Alexander, por darme la mayor alegría de mi vida.
<b>Mi abuelita</b>	Marina Ofelia Vela Juárez (q. e. p. d.), por todas las enseñanzas que me dio en vida.
<b>Mi hermana</b>	Mónica Paola, por ser ejemplo de superación.
<b>Mi familia</b>	Por apoyarme siempre en todas mis etapas de la vida y por todas las enseñanzas que me ha dado.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi casa de estudios.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por formarme como ingeniero Electrónico
<b>Ing. Rómulo Salguero</b>	Por darme el apoyo y enseñanzas en el campo de la metrología y alentarme a finalizar la carrera.
<b>Ing. Ramiro Santizo</b>	Por las enseñanzas y compartir sus conocimientos para este trabajo de graduación.
<b>Ing. Kenneth Estrada</b>	Por el apoyo y el seguimiento en el proceso de graduación.
<b>Centro Nacional de Metrología</b>	Por brindarme la oportunidad de contribuir al desarrollo del país en el campo de la metrología.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Historia.....	1
1.2. Laboratorio de Metrología del CII.....	3
1.2.1. Misión.....	4
1.2.2. Visión.....	4
1.2.3. Alcances.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Definición e historia de la metrología.....	7
2.1.1. Caracterización de la metrología.....	9
2.1.1.1. Metrología científica.....	9
2.1.1.2. Metrología industrial.....	9
2.1.1.3. Metrología legal.....	9
2.2. Sistema Internacional de Unidades (SI).....	10
2.2.1. Unidad de intensidad de corriente eléctrica (Ampere).....	11
2.3. Patrón de tensión directa.....	11
2.3.1. Patrón de medida (definición).....	11

2.3.2.	Efecto Josephson como patrón de tensión directa	12
2.3.2.1.	El efecto túnel cuántico.....	13
2.3.3.	Clasificación de los patrones de tensión directa .....	16
2.3.3.1.	Celda saturada como patrón de tensión directa .....	16
2.3.3.2.	Definición del Sistema Internacional ..	18
2.3.3.3.	Patrón nacional.....	19
2.3.3.4.	Patrón de referencia .....	19
2.3.3.5.	Patrón de trabajo .....	19
2.3.4.	Trazabilidad metrológica.....	20
2.3.5.	Gráfico de control .....	21
2.3.5.1.	Errores sistemáticos .....	25
2.3.6.	Cálculo de incertidumbre .....	26
2.3.6.1.	Incertidumbre tipo A y tipo B.....	27
2.3.6.2.	Asignación de las componentes de la incertidumbre .....	28
2.3.6.2.1.	Incertidumbre debido a la falta de repetitividad .....	28
2.3.6.2.2.	Incertidumbre debido a la resolución del multímetro a calibrar ....	28
2.3.6.2.3.	Incertidumbre de calibración del patrón (VS) .....	29
2.3.6.2.4.	Cálculo de la incertidumbre expandida final (con	

	factor de cobertura, k =2) .....	29
3.	MARCO METODOLÓGICO .....	31
3.1.	Realización del inventario .....	31
3.1.1.	Patrón de tensión DC .....	31
3.1.2.	Detector de nulos .....	31
3.1.3.	Multímetro digital de 8 1/2 dígitos de resolución .....	32
3.2.	Diagnóstico inicial .....	32
3.3.	Mantenimiento preventivo y correctivo .....	32
3.4.	Elaboración de procedimientos para el mantenimiento de la unidad de tensión .....	33
3.5.	Materiales utilizados .....	34
3.5.1.	Multímetro digital de 8 ½ dígitos de resolución .....	34
3.5.1.1.	Operaciones previas .....	35
3.5.1.2.	Conexión de cables para medición ....	37
3.5.1.2.1.	Uso del botón Guard .....	37
3.5.1.2.2.	Conexiones para medición de relación .....	38
3.5.1.2.3.	Medición a dos hilos; voltaje o resistencia .....	39
3.5.1.2.4.	Mediciones de corriente AC, DC .....	39
3.5.1.2.5.	Medición de resistencia a cuatro hilos .....	40
3.5.2.	Detector de nulos o ceros .....	41
3.6.	Procedimiento para cálculo de incertidumbre usando técnicas de medición de relación de multímetro de 8 ½ dígitos .....	42

3.7.	Tipos de procedimientos para cálculo de incertidumbre utilizando el multímetro digital de 8 ½ dígitos .....	43
3.7.1.	Mediciones automáticas de la relación utilizando el multímetro digital de 8 ½ dígitos .....	45
3.7.2.	Mediciones de relación manual utilizando el multímetro de 8 ½ dígitos .....	46
3.8.	Procedimiento para el mantenimiento de la unidad de tensión utilizando el detector de nulos JRL, modelo ND-106 .....	51
3.8.1.	Técnica de medición.....	52
3.8.2.	Diseño para grupos de 3 y 4 celdas .....	54
3.8.3.	Cambio de restricción.....	57
3.8.4.	Intercomparación de un grupo de tres celdas patrón .....	59
3.9.	Procedimiento recomendado por el fabricante de las celdas para conocer la tensión en función de la temperatura del horno .....	62
3.9.1.	Voltaje de celda .....	62
3.9.2.	Monitoreo de temperatura .....	63
3.9.3.	Comparaciones de voltaje de celda de registro .....	64
CONCLUSIONES .....		67
RECOMENDACIONES .....		69
BIBLIOGRAFÍA .....		71
APÉNDICES .....		73
ANEXOS .....		77

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Organigrama del Laboratorio de Metrología .....	3
2.	Efecto Túnel .....	16
3.	Celda saturada .....	17
4.	Gráfico de control típico para el mantenimiento de la vigilancia sobre un grupo de celdas .....	25
5.	Multímetro digital marca Agilent modelo 3458A.....	35
6.	Terminal Guard .....	38
7.	Conexión para medición de relación.....	38
8.	Conexión para medición de resistencia a 2 hilos .....	39
9.	Conexión para medición de corriente AC/DC .....	40
10.	Conexión para medición de resistencia a 4 hilos .....	40
11.	Detector de nulos marca JRL, modelo ND-106 .....	42
12.	Medición automatizada.....	45
13.	Medición manual .....	47
14.	Conexión oposición serie .....	55
15.	Patrón de tensión continua SCO 106 .....	65

## TABLAS

I.	Factores para establecer controles de límite de $3\sigma$ para el diseño de gráficas .....	24
II.	Medida automática de relación 1:1 y 10:1 .....	46
III.	Medición de relación manual 1:1 y 10:1 .....	47



IV.	Mediciones manuales de la relación 1:1 y 10:1 utilizando las especificaciones de precisión de transferencia del DMM.....	48
V.	Comparación de medidas de relación.....	51
VI.	Cambio de valores de celdas 5 y 6 .....	57
VII.	Nuevo promedio .....	58
VIII.	Esquema de medición .....	60

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Ampere
<b>cd</b>	Candela
<b>K</b>	Kelvin
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>m</b>	Metro
<b>mol</b>	Mol
<b>s</b>	Segundo



## **GLOSARIO**

### **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.

### **Exactitud de medición**

Grado de concordancia entre el resultado de una medición y el valor verdadero (o real) de lo medido (el mensurando).

### **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. La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones, así como la incertidumbre debida a la definición. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se

tratan como componentes de incertidumbre. (Nota 1). El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina incertidumbre típica de medida (o un múltiplo de ella), o la semiapertura de un intervalo con una probabilidad de cobertura determinada. (Nota 2). En general, la incertidumbre de medida incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones típicas, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información. (Nota 3). En general, para una información dada, se sobrentiende que la incertidumbre de medida está asociada a un valor determinado atribuido al mensurando. Por tanto, una modificación de este valor supone una modificación de la incertidumbre asociada. (Nota 4).

<b>Magnitud (medible)</b>	Atributo de un fenómeno, de un cuerpo o de una sustancia, que es susceptible de distinguirse cualitativamente y de determinarse cuantitativamente.
<b>Medición</b>	Conjunto de operaciones que tienen por finalidad determinar el valor de una magnitud.
<b>Medida materializada</b>	Dispositivo destinado a reproducir o a proveer, de forma permanente durante su empleo, uno o varios valores conocidos de una magnitud dada.
<b>Mensurando</b>	Magnitud dada, sometida a medición.
<b>Metrología</b>	Ciencia de las mediciones y sus aplicaciones. La metrología incluye todos los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones, cualesquiera que sean su incertidumbre de medida y su campo de aplicación.
<b>Patrón</b>	Medida materializada, aparato de medición, material de referencia o sistema de medición, destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o varios valores de una magnitud para servir de referencia. Los patrones pueden ser internacionales (reconocidos por acuerdo internacional) y nacionales (reconocidos por acuerdo nacional).

<b>Patrón de referencia</b>	Patrón, generalmente de la más alta calidad metrológica disponible en un lugar u organización dados, del cual se derivan las mediciones que se hacen en dicho lugar u organización.
<b>Patrón de trabajo</b>	Patrón utilizado corrientemente para controlar medidas materializadas, aparatos de medición o materiales de referencia.
<b>Patrón de transferencia</b>	Patrón empleado como intermediario para comparar patrones entre sí.
<b>Patrón primario</b>	Patrón que se designa o se recomienda por presentar las más altas calidades metrológicas y cuyo valor se establece sin referirse a otros patrones de la misma magnitud.
<b>Patrón secundario</b>	Patrón cuyo valor se establece por comparación con un patrón primario de la misma magnitud.
<b>Repetibilidad</b>	Grado de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas de un mismo mensurando, llevadas a cabo totalmente bajo las mismas condiciones de medición.
<b>Reproducibilidad</b>	Grado de concordancia entre los resultados de las mediciones de un mismo mensurando,

llevadas a cabo haciendo variar las condiciones de medición.

### **Sistema Internacional de Unidades**

Sistema de unidades basado en el Sistema Internacional de Magnitudes, con nombres y símbolos de las unidades, y con una serie de prefijos con sus nombres y símbolos, así como reglas para su utilización, adoptado por la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM). Nota: El SI está basado en las siete magnitudes básicas del ISQ (Sistema Internacional de Magnitudes).

### **Trazabilidad**

Propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón de estar relacionado a referencias establecidas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena continua de comparaciones, todas ellas con incertidumbres establecidas. Nota: dado que no en todos los países se emplea la misma forma de escribir los números, vale aclarar que en este documento se utiliza la coma para indicar decimales y una x para el signo de multiplicación. Así, por ejemplo, escribiremos  $6,023 \times 10^{23}$  y no  $6.023 \times 10^{23}$ .



**Unidad (de medida) de base** Magnitud escalar real, definida y adoptada por convenio, con la que se puede comparar cualquier otra magnitud de la misma naturaleza para expresar la relación entre ambas mediante un número.

**Valor (de una magnitud)** Expresión cuantitativa de una magnitud en particular, generalmente bajo la forma de una unidad de medida multiplicada por un número.

## RESUMEN

En el Laboratorio de Metrología Rodolfo Koenigsberger del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, el patrón de referencia de fuerza electromotriz de tensión directa es mantenido por un grupo de 3 celdas patrón saturadas. Algunos laboratorios usan grupos que contienen desde 3 a 6 celdas mantenidas en ambiente controlado. Las celdas son generalmente calibradas en un instituto metrológico nacional o internacional de mayor jerarquía que cuenten con el efecto Josephson, a intervalos periódicos, y la fem media del grupo se considera constante entre calibraciones. Como tales calibraciones no son muy frecuentes (a intervalos de un año o más), deben ser empleadas algunas técnicas para el mantenimiento y vigilancia de la unidad local entre calibraciones.

Comenzando con los valores, asignados a cada celda del grupo como un conjunto dado de puntos de referencia, se puede comprobar la relativa estabilidad de las celdas por medición de las diferencias entre ellas.

Este trabajo detalla tres técnicas de medición:

- Medición de relación con multímetro digital de 8 ½ dígitos de resolución
- Intercomparación entre celdas patrón
- Medición de temperatura del horno de las celdas

Todos estos procedimientos tienen la misma función: mantener un control sobre la tensión eléctrica de cada una de las celdas para verificar su estabilidad en el tiempo.



# OBJETIVOS

## General

Elaborar la documentación técnica para el monitoreo de la referencia de tensión directa mantenido por un grupo de celdas patrón, usando la técnica de intercomparación entre las celdas para el Laboratorio de Metrología del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

## Específicos

1. Realizar inventario y diagnóstico de los equipos con los que cuenta el laboratorio.
2. Recopilar datos históricos de celda SCO-106.
3. Documentar procedimiento para monitoreo del volt mantenido por un grupo de celdas patrón.
4. Documentar procedimiento para cálculo de incertidumbre utilizando técnicas de medición de relación y multímetro digital de 8 ½ dígitos de resolución.
5. Realizar recomendaciones para la mejora del laboratorio con base en el trabajo realizado en el laboratorio.



## INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Metrología Ingeniero Rodolfo Koenigsberger del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la USAC se creó con la finalidad de proporcionar a los diferentes laboratorios que integran el CII, facultades y centros de investigación de la USAC, así como diversos sectores (científico, industrial, legal, salud, entre otros) de la sociedad guatemalteca que lo requieran, una infraestructura científica y tecnológica en materia de metrología, que transmita los conocimientos en la materia y transfiera la trazabilidad de los patrones de este laboratorio.

El laboratorio cuenta con un sistema de transferencia de tensión directa, conformado por celdas patrones de referencia de tensión continua, un potenciómetro y un divisor de voltaje primario, para tensión directa, patrón para tensión alterna, patrones de resistencia, inductancia y capacitancia y de energía eléctrica. También cuenta con un multímetro de alta exactitud de 8 ½ dígitos de resolución.

En el presente trabajo se desarrolla toda la información técnica para la vigilancia y mantenimiento del patrón de tensión directa, así como diferentes técnicas para transferencia de la trazabilidad metrológica.



# 1. ANTECEDENTES

## 1.1. Historia

La Universidad de San Carlos de Guatemala inicia las actividades en la ciencia de las mediciones o metrología en el año 1969, con el establecimiento de la Sección de Metrología Eléctrica, situada en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, de la Facultad de Ingeniería, con el apoyo de la Organización de Estados Americanos (OEA), debido a la iniciativa mostrada por el pionero de la metrología en Guatemala: Ingeniero Rodolfo Koenigsberger.

En el año 1979, para asegurar uniformidad de las mediciones realizadas en el hemisferio occidental, la Sección de Metrología Eléctrica de la Universidad de San Carlos de Guatemala participa como miembro fundador del Sistema Interamericano de Metrología a través del Centro de Investigaciones.

En la segunda mitad del año 2016 se inició con un proyecto para la creación del Laboratorio de Metrología del Centro de Investigaciones de Ingeniería Ing. Rodolfo Koenigsberger, sustituyendo así a la sección de Metrología Eléctrica. Este proyecto se aprobó en octubre de 2017.

- Estructura administrativa y técnica del Laboratorio de Metrología del Centro de Investigaciones de Ingeniería

El Laboratorio de Metrología del Centro de Investigaciones de Ingeniería estará integrado por las magnitudes de variables eléctricas, masa, fuerza, presión, volumen, longitud, unidad de desarrollo tecnológico y las magnitudes



que se abran posteriormente a su creación. El laboratorio de metrología contará con un jefe y el personal técnico necesario que estará a cargo de las diferentes magnitudes.

- Descripción de puestos referidos en el organigrama, responsabilidades y funciones

A continuación se presenta la descripción.

- Jefe de Laboratorio de Metrología del CII

El jefe del Laboratorio de Metrología del CII de la USAC estará a cargo de la gestión administrativa y técnica del laboratorio, tendrá a su cargo el personal técnico responsable de las diferentes magnitudes que integran el laboratorio.

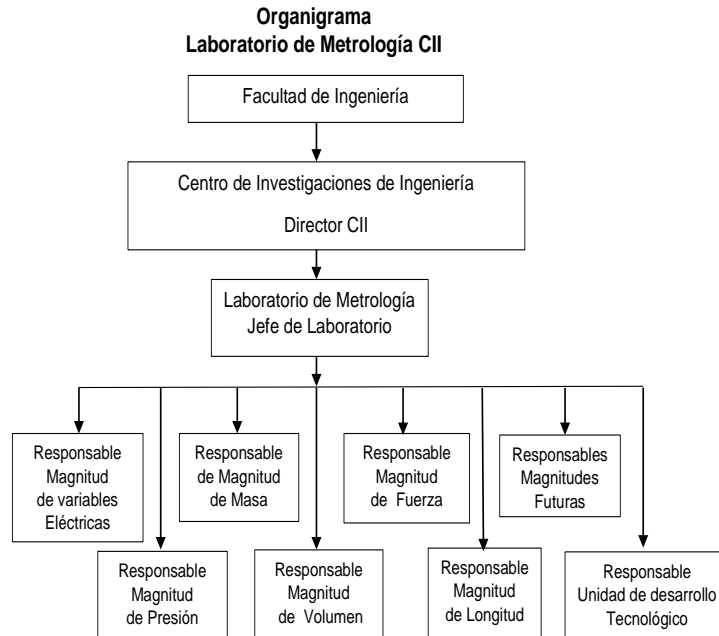
- Responsable de magnitud

El responsable de magnitud estará a cargo de mantener la trazabilidad, el sistema de calidad y aseguramiento metrológico y prestar el servicio de calibración de la magnitud a su cargo y demás funciones que le sean asignadas por el jefe del laboratorio.

- Organigrama

El organigrama puede observarse en la siguiente página:

Figura 1. **Organigrama del Laboratorio de Metrología**



Fuente: elaboración propia.

## 1.2. Laboratorio de Metrología del CII

El laboratorio de metrología tiene como finalidad cumplir con los objetivos que establece la creación de la Universidad de San Carlos de Guatemala, de docencia, investigación, extensión y servicio, mediante la docencia a estudiantes de ingeniería, asesoría en la ejecución de estudios y proyectos de investigación y trabajos de graduación, así como el préstamo de servicios de calibración de instrumentos de medición a los diferentes sectores de la sociedad guatemalteca que lo soliciten, actividad que reafirma el compromiso que tiene la Universidad de San Carlos de Guatemala con la sociedad guatemalteca en la solución de su problemática en materia de metrología.

El Laboratorio de Metrología tiene como finalidad proporcionar a las diferentes secciones y laboratorios que integran el CII, laboratorios de la Facultad de Ingeniería, facultades y centros de investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala, así como a los diversos sectores de la sociedad guatemalteca, de una infraestructura científica y tecnológica que proporcione certeza a las mediciones realizadas en el área de salud, industrial, comercial, ambiental, entre otras, con reconocimiento tanto a nivel nacional como internacional, mediante la transferencia de la trazabilidad de los patrones de este laboratorio, los cuales se encuentran referidos a patrones de laboratorios de reconocido prestigio nacional e internacional.

#### **1.2.1. Misión**

Prestar el servicio de calibración con reconocimiento nacional e internacional a los instrumentos de medición utilizados en los ensayos efectuados en las secciones y laboratorios que integran el CII, laboratorios de la Facultad de Ingeniería, facultades y centros de investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala, al sector científico, industrial, de salud, ambiental, legal y demás que lo soliciten conforme lo establecido en la Norma COGUANOR ISO 17025, COGUANOR -ISO/IEC 17025:2017-Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración

#### **1.2.2. Visión**

Ser una infraestructura científica y tecnológica con reconocimiento internacional y nacional, que proporcione certeza a las mediciones realizadas durante los ensayos efectuados en las secciones y laboratorios que integran el CII, laboratorios de la Facultad de Ingeniería, facultades y centros de investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala y los diversos

sectores científico, industrial, legal, área de salud y demás de la sociedad guatemalteca, mediante la transferencia de la trazabilidad de los patrones de este laboratorio, a través del proceso de calibración de instrumentos de medición.

### **1.2.3. Alcances**

Actualmente el laboratorio presta los siguientes servicios de calibración:

- Servicio de calibración de esfigmomanómetros.
- Servicio de calibración de manómetros de fluidos en el rango de 0 MPa a 60 MPa.
- Servicio de calibración de balanzas analíticas hasta 1500 g.
- Servicio de calibración y verificación de contadores de energía eléctrica.
  - Clase 0,1 y 0,2
  - Clase 0,5
  - Clase 1 y 2



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Definición e historia de la metrología**

Parafraseando el VIM (Vocabulario Internacional de Metrología), es la ciencia de las mediciones y sus aplicaciones. La metrología incluye todos los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones, cualesquiera que sean su incertidumbre de medida y su campo de aplicación.

La aparición de sistemas de pesas y medidas se pierde en el tiempo. No conocemos lo que pudo haberse dado en el Lejano Oriente; sin embargo, aparecen sin lugar a duda en las civilizaciones de Mesopotamia y -desde luego- es claro que la construcción de las pirámides de Egipto (3000 a 1800 A.C.) demandó elaborados sistemas de medición.

En particular conocemos, y en cierta forma aún se emplean, las mediciones lineales que se usaron antiguamente en Egipto (el jeme, la cuarta, el palmo, el codo, el pie).

Para principios del segundo milenio, las diferentes medidas en uso habían proliferado de forma incontrolable. Se tenía, por ejemplo, diferentes medidas de capacidad según el producto de que se tratase, ya fuese vino o cerveza, trigo o cebada. A veces las medidas variaban de provincia a provincia o de ciudad a ciudad.

Inglaterra utilizaba medidas de origen anglosajón y buscó la forma de mejorar y, por su parte, Francia creó y desarrolló un sistema, simple y lógico,

basado en los principios científicos más avanzados que se conocían en esa época (finales del siglo XVIII): el sistema métrico decimal que entró en vigor durante la Revolución Francesa. Su nombre viene de lo que fue su unidad de base: el metro, en francés *mètre*, derivado a su vez del griego *metrón* que significa medida, y del uso del sistema decimal para establecer múltiplos y submúltiplos. En su versión primera, el metro se definió como la diezmillonésima parte de la longitud de un cuadrante del meridiano terrestre y se determinó midiendo un arco de meridiano entre Dunkerque en Francia y Barcelona en España.

En la actualidad, en consonancia con el enfoque global, cada vez son más los países que están adoptando por ley el Sistema Internacional de Unidades (SI), basado en el sistema métrico decimal, con la consiguiente adopción de los patrones y técnicas de medición correspondientes.

Cuarenta y ocho naciones han suscrito el Tratado de la Convención del Metro, en el que se adoptó el Sistema Internacional de Unidades (SI). La Convención otorga autoridad a la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM-Conferencia General de Pesas y Medidas), al Comité International des Poids et Mesures (CIPM-Comité Internacional de Pesas y Medidas) y al Bureau International des Poids et Mesures (BIPM-Oficina Internacional de Pesas y Medidas), para actuar a nivel internacional en materia de metrología.

La CGPM está constituida por representantes de los países miembros y se reúne cada cuatro años en París, Francia. En ella se discuten y examinan los acuerdos que aseguran el mejoramiento y diseminación del Sistema Internacional de Unidades.

### **2.1.1. Caracterización de la metrología**

Por conveniencia, se hace a menudo una distinción entre los diversos campos de aplicación de la metrología, suele distinguirse entre metrología científica, metrología legal y metrología industrial.

#### **2.1.1.1. Metrología científica**

Es el conjunto de acciones que persiguen el desarrollo de patrones primarios de medición para las unidades de base y derivadas del Sistema Internacional de Unidades (SI).

#### **2.1.1.2. Metrología industrial**

La función de la metrología industrial reside en la calibración, control y mantenimiento adecuados de todos los equipos de medición empleados en producción, inspección y pruebas. Esto con la finalidad de que pueda garantizarse que los productos están de conformidad con normas. El equipo se controla con frecuencias establecidas y de forma que se conozca la incertidumbre de las mediciones. La calibración debe hacerse contra equipos certificados, con relación válida conocida a patrones, por ejemplo, los patrones nacionales de referencia.

#### **2.1.1.3. Metrología legal**

Según la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), es la totalidad de los procedimientos legislativos, administrativos y técnicos establecidos por, o por referencia a, autoridades públicas y puestas en vigor por su cuenta con la finalidad de especificar y asegurar, de forma regulatoria o



contractual, la calidad y credibilidad apropiadas de las mediciones relacionadas con los controles oficiales, el comercio, la salud, la seguridad y el ambiente.

## **2.2. Sistema Internacional de Unidades (SI)**

Sistema de unidades basado en el Sistema Internacional de Magnitudes, con nombres y símbolos de las unidades, y con una serie de prefijos con sus nombres y símbolos, así como reglas para su utilización, adoptado por la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM). El Sistema Internacional de Unidades, SI, basado en el segundo, el metro, el kilogramo, el amperio, el kelvin, el mol y la candela (las unidades básicas), está siendo revisado para actualizar las definiciones de cuatro de estas unidades.

En noviembre de 2018 se revisaron las definiciones del kilogramo, amperio, kelvin y mol para que sean aprobadas por la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), el organismo internacional responsable de la comparabilidad global de las mediciones. Se espera que las definiciones revisadas entren en vigor el 20 de mayo de 2019.

Las definiciones revisadas se basarán en siete constantes físicas (por ejemplo, la velocidad de la luz, la constante de Planck y la constante de Avogadro) y, por lo tanto, inherentemente estables. Las magnitudes se han elegido de forma que las definiciones revisadas no deban modificarse para acomodar futuras mejoras en las tecnologías utilizadas para sus realizaciones prácticas.

La revisión del SI en esta forma fue prevista en las Resoluciones de la CGPM adoptadas en 2011 y 2014. Los requisitos adicionales contenidos en dichas resoluciones aseguran una transición sin problemas hacia las cuatro

definiciones revisadas. La mayoría de los usuarios no notarán el cambio. Una nueva edición de la publicación sobre el SI proporcionará información esencial a los usuarios y estará disponible después de que las definiciones revisadas hayan sido adoptadas formalmente. También habrá directrices sobre la realización práctica de las unidades.

### **2.2.1. Unidad de intensidad de corriente eléctrica (Ampere)**

El ampere, símbolo A, es la unidad de corriente eléctrica del SI. Se define tomando el valor numérico fijo de la carga elemental del electrón  $e$  igual a  $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$  cuando se expresa en la unidad C, que es igual a A s, donde el segundo se define en términos de  $\Delta\nu_{Cs}$ .

### **2.3. Patrón de tensión directa**

Se mide de la siguiente manera:

#### **2.3.1. Patrón de medida (definición)**

Se define según el VIM como la “realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia”<sup>1</sup>.

La “realización de la definición de una magnitud dada”<sup>2</sup> puede establecerse mediante un sistema de medida, una medida materializada o un material de referencia.

---

<sup>1</sup> Vocabulario Internacional de Metrología. *Patrón de medida*. s/p

<sup>2</sup> *Ibíd.*

Un patrón se utiliza frecuentemente como referencia para obtener valores medidos e incertidumbres de medida asociadas para otras magnitudes de la misma naturaleza, estableciendo así la trazabilidad metrológica, mediante calibración de otros patrones, instrumentos o sistemas de medida.

El término realización se refiere a tres procedimientos. El primero, la realización *stricto sensu*, es la realización física de la unidad de medida a partir de su definición. El segundo, denominado reproducción, consiste no en realizar la unidad a partir de su definición, sino en construir un patrón altamente reproducible basado en un fenómeno físico, por ejemplo, el empleo de láseres estabilizados en frecuencia para construir un patrón del metro, el empleo del efecto Josephson para el volt o el efecto Hall cuántico para el ohm. El tercer procedimiento consiste en adoptar una medida materializada como patrón. Como era el caso del patrón de 1 kg.

### **2.3.2. Efecto Josephson como patrón de tensión directa**

El efecto Josephson es un efecto físico que se manifiesta por la aparición de una corriente eléctrica por efecto túnel entre dos superconductores separados. El físico británico Brian David Josephson predijo tal efecto en 1962. Estos trabajos le valieron a Josephson el premio Nobel de Física en 1973.

Según la teoría de la superconductividad, la corriente eléctrica en los superconductores no la transportan electrones simples como sería el caso normal, sino pares de electrones, los llamados pares de Cooper.

Cuando los dos superconductores están separados por una capa de un medio aislante o un metal no superconductor de unos pocos nanómetros, los pares de Cooper pueden atravesar la barrera por efecto túnel, un efecto

característico de la mecánica cuántica. Aunque los pares de Cooper no pueden existir en un aislante o un metal no superconductor, cuando la capa que separa los dos superconductores es lo suficientemente estrecha, estos la pueden atravesar y guardar su coherencia de fase. Es la persistencia de esta coherencia de fase lo que da lugar al efecto Josephson.

Las ecuaciones básicas que gobiernan la dinámica del efecto Josephson son:

$$U(t) = \frac{\hbar}{2e} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (\text{Ecuación de la evolución de fase superconductor})$$

$$I(t) = I_c \sin(\phi(t)) \quad (\text{Relación de Josephson o de enlace débil corriente-fase})$$

Donde  $U(t)$  e  $I(t)$  son los voltajes y la corriente a través de la unión de Josephson,  $\phi(t)$  es la diferencia de fase entre las funciones de onda en los dos superconductores que forman la unión, e  $I_c$  es una constante, la corriente crítica de la unión. La corriente crítica es un parámetro experimental importante del dispositivo que puede alterarse tanto por la temperatura como por un campo magnético aplicado. La constante física,  $\frac{\hbar}{2e}$  es el cuanto, de flujo magnético, la inversa del cual es la constante de Josephson.

### **2.3.2.1. El efecto túnel cuántico**

En mecánica cuántica, el efecto túnel es un fenómeno cuántico por el que una partícula viola los principios de la mecánica clásica penetrando una barrera de potencial o impedancia mayor que la energía cinética de la propia partícula. Una barrera, en términos cuánticos aplicados al efecto túnel, se trata de una cualidad del estado energético de la materia análogo a una colina o pendiente

clásica, compuesta por crestas y flancos alternos, que sugiere que el camino más corto de un móvil entre dos o más flancos debe atravesar su correspondiente cresta intermedia. Si el objeto no dispone de energía mecánica suficiente como para atravesar la barrera, la mecánica clásica afirma que nunca podrá aparecer en un estado perteneciente al otro lado de la barrera.

A escala cuántica, los objetos exhiben un comportamiento ondular; en la teoría cuántica, un cuanto moviéndose en dirección a una colina potencialmente energética puede ser descrito por su función de onda, que representa la amplitud probable que tiene la partícula de ser encontrada en la posición allende la estructura de la curva. Si esta función describe la posición de la partícula perteneciente al flanco adyacente al que supuso su punto de partida, existe cierta probabilidad de que se haya desplazado a través de la estructura, en vez de superarla por la ruta convencional que atraviesa la cima energética relativa. A esto se conoce como efecto túnel.

El diagrama (figura 2) compara el efecto de túnel con el movimiento clásico de un objeto. Por analogía con la gravedad, el objeto tiende a desplazarse en dirección al centro de la tierra. Clásicamente, para alcanzar el estado mínimo, debe proveerse con energía adicional. Bajo la ley de la mecánica cuántica, sin embargo, el objeto puede ocasionalmente atravesar el estado energético representado por las dos pendientes y la cresta hasta lograr un estado mínimo de potencial energético.

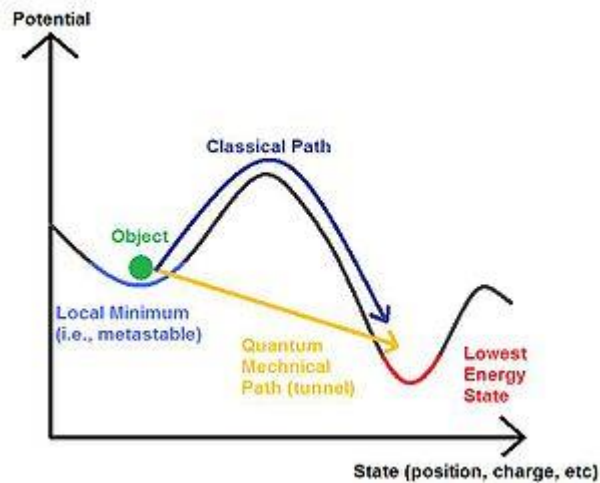
Considerando un móvil que circula a lo largo de la trayectoria que describe una vaguada (para los propósitos de la dilucidación, discriminar fuerzas adicionales a la gravedad), se dice que el mismo se encuentra a 500 metros sobre el nivel del mar, la cima de la montaña, simbolizada por una cresta energética,

alcanza los 1000 metros, y el plano más allá de la misma, se encuentra a la altura del mar.

Toda instancia o entidad material que conocemos tiende a su nivel mínimo energético (esto es, mayor entropía, por lo que el objeto tratará de descender tanto como sea posible). En la mecánica clásica, mientras una posición del plano sea energéticamente menor que aquella que ocupa el móvil, sin compromiso ulterior con las fuerzas añadidas al sistema, este no tendrá la capacidad de por sí para alcanzar esa posición. Sin embargo, si existiera un túnel comunicante entre ambos flancos de la montaña, el móvil se desplazaría a través de ella sin la necesidad de una energía suplementaria a la misma gravedad.

En aplicación a una partícula que se rige bajo los preceptos de la mecánica clásica, esto es considerado tunelado cuántico. Se trata de un efecto válido en escalas fenomenológicas extremadamente mínimas, generalmente, solo puede ser observado cuando existe un intercambio energético entre partículas de tamaño atómico o más reducidas, en las cuales el potencial del intercambio o trasvase con las fuerzas que ello involucra, lo transforma en un fenómeno notablemente más complejo, y no existen vasos comunicantes entre túneles de recorrido creciente. Este fenómeno, como se ha expuesto antes, solo permite graduar la energía del espacio que recorre la partícula de forma decreciente y de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica.

Figura 2. Efecto Túnel



Fuente: elaboración propia.

### 2.3.3. Clasificación de los patrones de tensión directa

Por sus aplicaciones y usos, los patrones están divididos en:

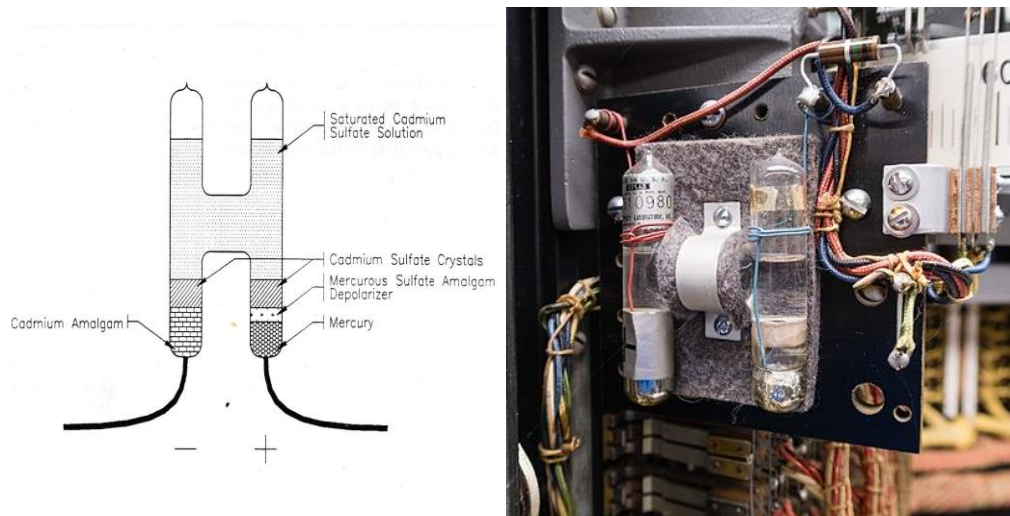
#### 2.3.3.1. Celda saturada como patrón de tensión directa

La celda estándar de Weston es una celda química húmeda que produce un voltaje muy estable adecuado como estándar de laboratorio para la calibración de voltímetros. Inventado por Edward Weston en 1893, fue adoptado como Estándar Internacional para EMF (Electromotive Force, fuerza electromotriz) desde 1911 hasta que fue reemplazado por el estándar de voltaje Josephson en 1990.

El ánodo es una amalgama de cadmio con mercurio con un cátodo de mercurio puro sobre el que se coloca una pasta de sulfato de mercurio y mercurio. El electrolito es una solución saturada de sulfato de cadmio y el despolarizador es una pasta de sulfato mercurioso. Los cristales de sulfato de cadmio cubren ambas amalgamas para asegurar que el electrolito permanezca saturado (de aquí proviene el nombre de celda saturada).

Como se muestra en la figura 3, la celda se coloca en un recipiente de vidrio en forma de H con la amalgama de cadmio en un lado y el mercurio puro en la otra. Las conexiones eléctricas a la amalgama de cadmio y al mercurio se realizan mediante cables de platino fusionados a través de los extremos inferiores del recipiente.

Figura 3. **Celda saturada**



Fuente: elaboración propia.

Las celdas de referencia deben aplicarse de tal manera que no se extraiga corriente de ellas.



El diseño original era una celda de cadmio saturado que producía una referencia de 1,018638 V y tenía la ventaja de tener un coeficiente de temperatura más bajo que la celda Clark utilizada anteriormente.

Una de las grandes ventajas de la celda normal de Weston es su pequeño cambio de fuerza electromotriz con el cambio de temperatura. A cualquier temperatura  $t$  entre  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $E_t / V = E_{20} / V - 0,0000406 (t / ^{\circ}\text{C} - 20) - 0,00000095 (t / ^{\circ}\text{C} - 20)^2 + 0,00000001 (t / ^{\circ}\text{C} - 20)^3$ . Esta fórmula de temperatura fue adoptada por la conferencia de Londres de 1908.

El coeficiente de temperatura se puede reducir cambiando a un diseño no saturado, el tipo predominante en la actualidad. Sin embargo, la salida de una celda insaturada disminuye en unos 80 microvoltios por año, lo que se compensa con una calibración periódica contra una celda saturada.

### **2.3.3.2. Definición del Sistema Internacional**

Realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia.

Nota 1: la realización de la definición de una magnitud dada puede establecerse mediante un sistema de medida, una medida materializada o un material de referencia.

Nota 2: el término realización se emplea aquí en su sentido más general. Se refiere a tres procedimientos. El primero, la realización *stricto sensu*, es la realización física de la unidad de medida a partir de su definición. El segundo, denominado reproducción, consiste no en realizar la unidad a partir de su definición, sino en construir un patrón altamente reproducible basado en un

fenómeno físico, por ejemplo, el empleo de láseres estabilizados en frecuencia para construir un patrón del metro, el empleo del efecto Josephson para el volt o el efecto Hall cuántico para el ohm. El tercer procedimiento consiste en adoptar una medida materializada como patrón. Este era el caso del patrón de 1 kg.

#### **2.3.3.3. Patrón nacional**

Patrón reconocido por una autoridad nacional para servir, en un estado o economía, como base para la asignación de valores a otros patrones de magnitudes de la misma naturaleza.

#### **2.3.3.4. Patrón de referencia**

- Un elemento de la más alta calidad metrológica para una ubicación determinada del que se derivan las mediciones realizadas en esa ubicación.
- Patrón designado para la calibración de otros patrones de magnitudes de la misma naturaleza en una organización o lugar dado, por ejemplo: en el Centro Nacional de Metrología se utiliza el Fluke 732B, que es un conjunto de cuatro fuentes de tensión Zener como patrón de referencia calibrado en el NIST, que es el instituto nacional de patrones y tecnología de Estados Unidos para voltaje directo.

#### **2.3.3.5. Patrón de trabajo**

Patrón utilizado habitualmente para calibrar o verificar instrumentos o sistemas de medida.

Nota 1: un patrón de trabajo se calibra habitualmente con relación a un patrón de referencia.

Nota 2: un patrón de trabajo utilizado en verificación se designa también como patrón de verificación o patrón de control.

#### **2.3.4. 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

Nota 1: en esta definición, la referencia puede ser la definición de una unidad de medida, mediante una realización práctica, un procedimiento de medida que incluya la unidad de medida cuando se trate de una magnitud no ordinal, o un patrón.

Nota 2: la trazabilidad metrológica requiere una jerarquía de calibración establecida.

Nota 3: la especificación de la referencia debe incluir la fecha en la cual se utilizó dicha referencia, junto con cualquier otra información metrológica relevante sobre la referencia, tal como la fecha en que se haya realizado la primera calibración en la jerarquía.

Nota 4: para mediciones con más de una magnitud de entrada en el modelo de medición, cada valor de entrada debiera ser metrológicamente trazable y la jerarquía de calibración puede tener forma de estructura ramificada o de red. El

esfuerzo realizado para establecer la trazabilidad metrológica de cada valor de entrada debería ser en proporción a su contribución relativa al resultado de la medición.

Nota 5: la trazabilidad metrológica de un resultado de medida no garantiza por sí misma la adecuación de la incertidumbre de medida a un fin dado, o la ausencia de errores humanos.

### **2.3.5. Gráfico de control**

Los gráficos de control sobre los parámetros del proceso, tales como los valores de celda y las desviaciones estándar de una sola observación, proporcionan un medio eficaz para determinar si el proceso está en un estado de control estadístico. Se deben mantener gráficos de control para cada celda (o diferencia entre celdas), procesos de precisión (desviación estándar de una observación) y la fem residual P.

Estos gráficos proporcionan la verificación de esa parte de la declaración de incertidumbre que se ocupa de límites para el efecto del error aleatorio. Tales declaraciones dicen en efecto que si este proceso de medición se utiliza un gran número de veces, los valores obtenidos para una sola cantidad variarán dentro de límites establecidos. Los gráficos permiten demostrar la validez de tales declaraciones para cada ejecución, uno tendrá valores para cada una de las celdas, la desviación estándar y la fem residual.

Para comprobar el estado de control del proceso de medición y la estabilidad de las celdas, se debe estudiar la secuencia de valores para estos parámetros. Se pueden establecer gráficos de control en la fem de las celdas, la diferencia entre celdas sucesivas (por ejemplo, celda 1-celda 2, celda 2-celda

3, celda 3- celda k y demás), o ambas. El primero tiene la dificultad de que no es sensible a un cambio en la fem de una sola celda.

Sin embargo, siguiendo las diferencias entre celdas sucesivas (es decir, 1ª menos 2ª, 2ª menos 3ª y así sucesivamente) uno tiene una interpretación fácil del conjunto de resultados, aunque las sucesivas diferencias no sean independientes. Una celda mala aparecerá como fuera de control en dos diferencias sucesivas, mientras que las diferencias restantes no se ven afectados.

Para establecer límites de control, es necesario conocer la precisión del proceso de medición. Sin embargo, bajo el supuesto de que se conoce la desviación estándar,  $\sigma$ , del proceso, se puede, para un diseño dado, escribir las desviaciones estándar de la fem de una celda individual, la diferencia entre dos celdas, y para la P residual. Se puede usar tres veces la desviación estándar apropiada como límites de control.

Desafortunadamente, al iniciar dicha vigilancia, la precisión del proceso,  $\sigma$ , generalmente no se conoce y debe estimarse a partir de los datos disponibles. En este caso, se agruparía un número, m, de desviaciones estándar individuales usando la fórmula:

$$s_p^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_1^2$$

Para un diseño particular, esto podría implicar realizar varias muestras a la semana durante el primer mes aproximadamente.

Para obtener los límites de control de arranque, después de que se hayan acumulado unos 100 grados de libertad, se debe calcular un nuevo valor de  $S_p$  y

revisar los límites de control. Para una gran cantidad de grados de libertad  $s_p$  se aproxima muy de cerca, usando  $s_p$  y los límites de control de los factores.

En la figura 4 un gráfico de control sobre la desviación estándar del proceso debe construirse. También es deseable mantener un gráfico de control sobre la fem residual utilizando los límites dados en la tabla I. Inicialmente, el valor aceptado de  $P$  se tomaría como cero. Sin embargo, si después de repetidas mediciones el valor de  $P$  es distinto de cero y constante, el valor central y los límites de control debe ajustarse en consecuencia.

El inicio de cada tipo de gráfico de control se muestra en la figura 4. Para los gráficos de las celdas, los valores centrales para ambas celdas y la diferencia entre celdas deben basarse en los valores asignados.

El gráfico se puede mantener por número de ejecución o por tiempo. Este último tiene la ventaja de que se puede estimar la tasa de deriva si alguna celda muestra una tendencia.

Tabla I. **Factores para establecer controles de límite de  $3\sigma$  para el diseño de gráficas**

No. De Celdas excluidas del grupo media	Número de celdas en el grupo			
	3	4	5	6
	Valores de celdas			
0	1,0000	0,9186	1,2000	1,1260
1*	0,8660	0,8660	1,1619	1,1071
	1,500	1,2247	1,5000	1,3512
2*	0	0,750	1,0954	1,0794
	1,7320	1,2990	1,5492	1,3839
3*	--	0	0,9487	1,0000
	--	1,5000	1,6432	1,4392
	P residual			
	1,2247	0,8660	0,9487	0,8018
	Diferencias sucesivas ( $v_i - v_{i+1}$ )			
	1,7321	1,5000	1,8974	(1)
	Desviaciones estándar			
Límite superior	1,945	1,585	1,737	1,552
Línea central	0,888	0,950	0,933	0,963

Fuente: elaboración propia.

Los datos escritos en la parte superior son para las celdas incluidas en la media y los datos escritos en la parte inferior son para las celdas excluidas de la media. Para las diferencias (1-2) (2-3) (4-5) (5-6) el límite es 1,7321. Para las diferencias (4-5) (6-1) el límite es 1,7525.

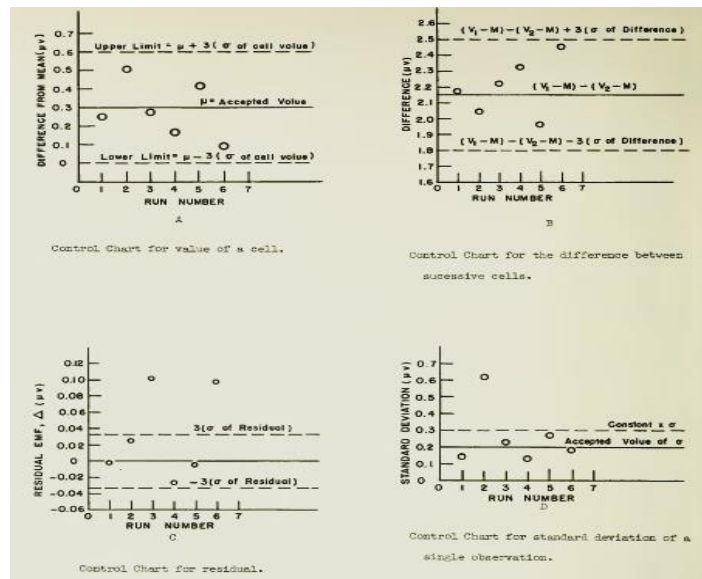
Si una celda se daña y se elimina de la media, pero aún se conserva en el grupo, entonces los límites deben modificarse en consecuencia (ver tabla 2). Es importante tener en cuenta que los gráficos de control en las celdas solo indican cambios en las fem o celdas relacionadas entre sí. Si todo el grupo está cambiando, no aparecerá en ninguno de los gráficos y solo se puede determinar

mediante comparación con otras celdas cuyos valores se conocen. Esta situación ocurre porque los grupos pequeños de las celdas suelen ser del mismo fabricante y lote y, por lo tanto, tienen similares características de envejecimiento.

### 2.3.5.1. Errores sistemáticos

Idealmente, un proceso de medición debe estar libre de errores sistemáticos, sin embargo, esto no es frecuentemente el caso. De hecho, el residual P es un error sistemático. Su efecto en los valores de las celdas es fácilmente eliminado y su magnitud estimada utilizando los diseños sugeridos. Otros errores sistemáticos no se detectan tan fácilmente. Indicaciones de su presencia en algunos casos pueden ser obtenidas por análisis de desviaciones de dos o más diseños sucesivos corriendo en el mismo grupo de celdas.

Figura 4. Gráfico de control típico para el mantenimiento de la vigilancia sobre un grupo de celdas



Fuente: elaboración propia.



### 2.3.6. Cálculo de incertidumbre

La incertidumbre del resultado de una medición refleja la imposibilidad de conocer exactamente el valor del mensurando. El resultado de una medición tras la corrección de los efectos sistemáticos identificados es aún una *estimación* del valor del mensurando, dada la incertidumbre debida a los efectos aleatorios y a la corrección imperfecta del resultado por efectos sistemáticos.

En la práctica existen numerosas fuentes posibles de incertidumbre en una medición, entre ellas:

- Muestra no representativa del mensurando, la muestra analizada puede no representar al mensurando definido.
- Conocimiento incompleto de los efectos de las condiciones ambientales sobre la medición, o medición imperfecta de dichas condiciones ambientales.
- Lectura sesgada de instrumentos analógicos, por parte del técnico.
- Resolución finita del instrumento de medida o umbral de discriminación.
- Valores inexactos de los patrones de medida o de los materiales de referencia.
- Valores inexactos de constantes y otros parámetros tomados de fuentes externas y utilizados en el algoritmo de tratamiento de los datos.
- Aproximaciones e hipótesis establecidas en el método y en el procedimiento de medida.
- Variaciones en las observaciones repetidas del mensurando, en condiciones aparentemente idénticas.

Estas fuentes no son necesariamente independientes y algunas de ellas pueden contribuir en h. Por supuesto, un efecto sistemático no identificado no

puede ser tenido en cuenta en la evaluación de la incertidumbre del resultado de una medición, aunque contribuirá a su error.

#### **2.3.6.1. Incertidumbre tipo A y tipo B**

Se agrupa a las componentes de la incertidumbre en dos categorías, según su método de evaluación, A y B, la incertidumbre típica tipo A se obtiene a partir de una función de densidad de probabilidad derivada de una distribución de frecuencia observada, mientras que una incertidumbre típica tipo B se obtiene a partir de una función de densidad de probabilidad supuesta o asumida, basada en el grado de confianza que se tenga en la ocurrencia del suceso. La evaluación tipo B de una componente de incertidumbre se basa habitualmente en un conjunto de informaciones fiables.

Un ejemplo de incertidumbre tipo A es tomar un número finito de lecturas, por ejemplo 20, encontrar el promedio de ellas, calcular su desviación estándar y dividirlo entre la raíz cuadrada del número de lecturas.

Un ejemplo de incertidumbre tipo B son los datos de incertidumbre obtenidos por medio resultados de mediciones anteriores, experiencia o conocimientos generales sobre el comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos utilizados, especificaciones del fabricante, datos suministrados por certificados de calibración u otros tipos de certificados, incertidumbres asignadas a valores de referencia procedentes de libros y manuales.

### **2.3.6.2. Asignación de las componentes de la incertidumbre**

Se da de la siguiente manera:

#### **2.3.6.2.1. Incertidumbre debido a la falta de repetitividad**

Se calcularán los estimadores estadísticos que caracterizan la dispersión de los resultados obtenidos. En particular se calculará la media aritmética de los valores de las mediciones, la desviación estándar experimental,  $S(X_m)$  y la desviación estándar experimental de la media que coincide con la incertidumbre típica de las mediciones.

Desviación estándar experimental de la media:  $U_{Xm} = \frac{S_{Xm}}{\sqrt{n}}$

#### **2.3.6.2.2. Incertidumbre debido a la resolución del multímetro a calibrar**

Se considera el máximo error posible que se puede cometer debido a la resolución del multímetro como  $\pm 0,5$  veces el último dígito (resolución=0,5 dígitos), la incertidumbre típica se hallará suponiendo una distribución rectangular y dividiendo por tanto por  $\sqrt{3}$ . El valor de esta contribución se expresará en unidades homogéneas con el resto de contribuciones:

$$U_{res} = \frac{Resolucion * 0,5}{\sqrt{3}}$$

### **2.3.6.2.3. Incertidumbre de calibración del patrón (VS)**

La incertidumbre de calibración del calibrador será la reflejada en el correspondiente certificado de calibración, para el punto considerado. Puesto que en los certificados se indican incertidumbres expandidas ( $U_{\text{certificado}}$ , con  $k=2$ ), para hallar la incertidumbre típica será necesario dividir el valor indicado por el valor de  $k_{\text{certificado}}$  (normalmente 2). En el caso de que el punto en el que se va a realizar la calibración del multímetro no coincida con un valor certificado del calibrador, se incluirá como componente de incertidumbre la mayor incertidumbre de calibración del calibrador de entre todos los puntos calibrados del rango en el que se usa:

$$U_{\text{certi}} = \frac{U_{\text{calibrador}}}{K}$$

### **2.3.6.2.4. Cálculo de la incertidumbre expandida final (con factor de cobertura, $k=2$ )**

Considerando que todas las variables de entrada son independientes, que por tanto no es necesario tener en cuenta los coeficientes de correlación, se tiene para la incertidumbre expandida:

$$U = k u_{\text{combinada}} = k \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_n^2}$$



### **3. MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Realización del inventario**

A continuación se detalla el inventario de equipos utilizados para el desarrollo del proyecto:

##### **3.1.1. Patrón de tensión DC**

Sistema de 3 celdas saturadas marca JRL modelo SCO-106. Esta celda química produce un EMF de aproximadamente 1.018XXX volts a temperatura ambiente, y la razón primordial para convertirse en el estándar del volt es debido a su estabilidad a largo plazo.

##### **3.1.2. Detector de nulos**

Detector de nulos o ceros marca JRL modelo ND-106, es un dispositivo extremadamente sensible y exacto, compatible con sistemas de alta precisión y sistemas primarios de medición. El ND-106 permite medir confiablemente potenciales tan pequeños como  $\pm 0.2 \mu\text{V}$ , o aún menores ( $0.1 \mu\text{V}$ ) cuando se aplican desde una fuente de baja impedancia. La impedancia de entrada es suficientemente alta ( $100\ 000 \Omega$ ) para asegurar que la fuente de señal no se sobrecarga en la mayoría de aplicaciones.

### **3.1.3. Multímetro digital de 8 1/2 dígitos de resolución**

Multímetro digital marca Agilent modelo 3458A, tiene una linealidad extraordinaria, bajo ruido interno y excelente estabilidad a corto plazo, aparte la obvia característica de la resolución.

### **3.2. Diagnóstico inicial**

Se verificó el patrón de tensión de 3 celdas saturadas marca JRL modelo SCO-106, y se encontró que, a pesar de estar operativo, tiene un daño en el control de temperatura que provoca variaciones de entre  $\pm 0,12$  grados Celsius.

Se verificó el detector de nulos o ceros marca JRL modelo ND-106 y se encuentra operando correctamente.

Se verificó el multímetro digital de 8 ½ dígitos de resolución, marca Agilent, modelo 3458A, y se comprobó que tiene daño en una tarjeta del conversor análogo digital (ADC), por lo que no se encuentra operando actualmente.

### **3.3. Mantenimiento preventivo y correctivo**

Se procedió a realizar mantenimiento correctivo a los equipos descritos anteriormente, con respecto a la celda SCO-106 se cambiaron 2 transistores, pero el problema se encuentra en el potenciómetro que regula la temperatura, por lo que se indica realizar la medición de la temperatura del horno con un multímetro y una sonda PT100 para determinar la temperatura de horno con al menos 3 dígitos de resolución y poder determinar mediante la ecuación que brinda el fabricante la tensión en la celda.

Para el multímetro digital se determinó que el daño se encuentra en la tarjeta del conversor ADC, al no poder realizar la reparación se buscó el repuesto en la página del fabricante, pero indican que es necesario enviar el multímetro para que el personal técnico de Agilent realice el cambio, ya que de lo contrario no aplican garantía.

#### **3.4. Elaboración de procedimientos para el mantenimiento de la unidad de tensión**

Para el aseguramiento de los resultados de la unidad de tensión directa se realizaron tres tipos de procedimientos, el primero de ellos se detalla en la sección 3.6 y se utiliza cuando se tiene al menos un valor de celda conocido mediante un certificado de calibración reciente y un multímetro de 8 ½ dígitos de resolución o más, su función principal es la medición de la relación de un valor de tensión desconocido en función de un valor de tensión conocido y en base a eso calcular el valor de tensión desconocido, así como el aporte de incertidumbre por la medición de relación con el multímetro.

El segundo procedimiento se detalla en la sección 3.8 y se utiliza cuando ya se conocen los valores de las celdas y sus respectivas incertidumbres, se realiza una comparación de una celda contra las demás utilizando el método estadístico combinación o permutación y con base en este método se miden las pequeñas diferencias entre las mismas, generalmente en el orden los micro volts y teniendo este registro de mediciones se puede predecir el comportamiento de las celdas y calcular su deriva en el tiempo.

El tercer y último procedimiento es el método recomendado por el fabricante del patrón primario de tensión DC, el cual se detalla en la sección 3.9, este



procedimiento se encuentra en función de la temperatura del horno para determinar la tensión de la celda.

### **3.5. Materiales utilizados**

Para poder llevar a cabo los procedimientos de medición, calibración y monitoreo de patrones metrológicos es necesario contar con instrumentos de laboratorio adecuados para llevar a cabo dichas tareas.

En este apartado se describen los instrumentos que se deben utilizar y las principales características con que deben contar dichos instrumentos para conseguir las mediciones con la mayor exactitud posible.

#### **3.5.1. Multímetro digital de 8 ½ dígitos de resolución**

En un laboratorio de calibración estándar se suele encontrar multímetros digitales desde 5 ½ hasta 8 ½ dígitos de resolución debido a que tienen una linealidad extraordinaria, bajo ruido interno y excelente estabilidad a corto plazo, aparte la obvia característica de la resolución. Algunas de las características comunes de estos multímetros son:

- Gran precisión de linealidad del convertidor análogo a digital (ADC).
- Trazabilidad metrológica debido a que su calibración se realiza utilizando los estándares intrínsecos de la matriz de conexiones de Josephson o celdas patrón que cuenten con trazabilidad metrológica.
- Precisión de transferencia para 10 voltios CC de 0,1 ppm.

- Ruido interno menor de 0,01 ppm produciendo 8,5 dígitos de resolución utilizable.

Para el desarrollo de los procedimientos que se mencionan en este trabajo se utiliza el multímetro digital marca Agilent modelo 3458A (figura 5), que cuenta con todas las características mencionadas en este apartado.

Figura 5. **Multímetro digital marca Agilent modelo 3458A**



Fuente: elaboración propia.

### **3.5.1.1. Operaciones previas**

Para preparar el multímetro para realizar mediciones confiables es necesario realizar algunas operaciones previas o configuraciones en el instrumento, como se describen a continuación:

Al encender el multímetro, este realiza automáticamente una autoprueba de encendido limitada. Sin embargo, antes de comenzar a realizar mediciones, es posible que desee tener más confianza en que el multímetro está en pleno funcionamiento. Este es el trabajo de la autocomprobación. La autoprueba realiza

una serie de pruebas que verifican la operatividad y precisión del multímetro desconectando las señales de entrada antes de ejecutar la autocomprobación. Tarda más de 50 segundos.

- Para ejecutar la autocomprobación, presione:



- Si la autocomprobación pasó, la pantalla muestra:

SELFTEST PASSED

- Indicando confianza en que el multímetro está operativo y asumiendo una calibración y autocalibración adecuadas.
- Si alguna de las pruebas falló, el anunciador ERR se ilumina y la pantalla muestra:

SELFTEST FAILED

- Para leer el error presione:



- Autoprueba de encendido: cuando se aplica energía, el multímetro verifica que el multímetro esté funcionando, pero no necesariamente verifica que las mediciones sean precisas.
- Estado de encendido: cuando finaliza la autocomprobación de encendido, el multímetro emite un pitido, se activa automáticamente, selecciona automáticamente el rango de voltaje de CC, además, el multímetro ha configurado muchos de sus comandos en valores de encendido predefinidos, esto se denomina estado de encendido.

### **3.5.1.2. Conexión de cables para medición**

Existen varias formas de conexión para diferentes tipos de mediciones, a continuación se enumeran las más utilizadas.

#### **3.5.1.2.1. Uso del botón Guard**

El terminal de protección del multímetro conectado al lado bajo de la fuente de medición (To LO) (medidas protegidas), proporciona un rechazo de modo común efectivo máximo (ECMR) en los terminales de entrada seleccionados por el interruptor de terminales, asumiendo que el interruptor de protección está en la posición abierta (hacia afuera). Para mediciones sin protección, presione el interruptor de protección (posición TO LO) y no conecte el terminal de protección a la fuente de medición. En la posición TO LO, el interruptor de protección conecta internamente el terminal de protección al terminal de entrada LO en los terminales seleccionados por el interruptor de terminales.

Se recomienda cables de alta impedancia y baja absorción dieléctrica para todas las conexiones de medición.

Figura 6. **Terminal Guard**

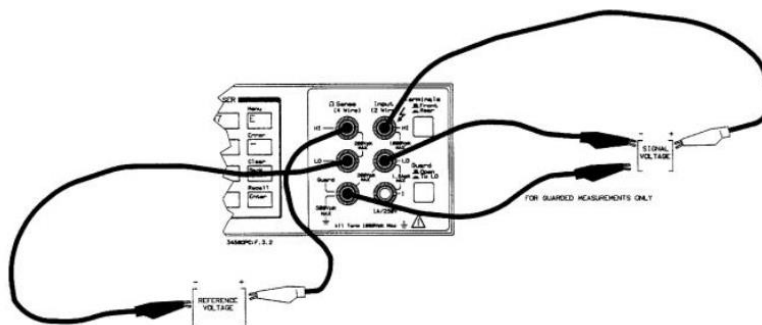


Fuente: elaboración propia.

### 3.5.1.2.2. Conexiones para medición de relación

Esta forma de conexión ocurre cuando se utiliza el multímetro como un medidor de relación entre una celda de referencia y una celda de valor desconocido, el cociente es la constante de relación entre estas dos celdas.

Figura 7. **Conexión para medición de relación**

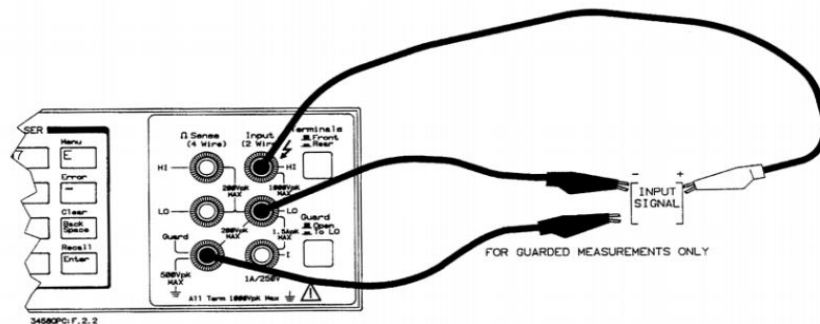


Fuente: elaboración propia.

### 3.5.1.2.3. Medición a dos hilos; voltaje o resistencia

Esta forma de conexión ocurre cuando se utiliza el multímetro para medir tensión DC, AC o resistencia.

Figura 8. Conexión para medición de resistencia a 2 hilos

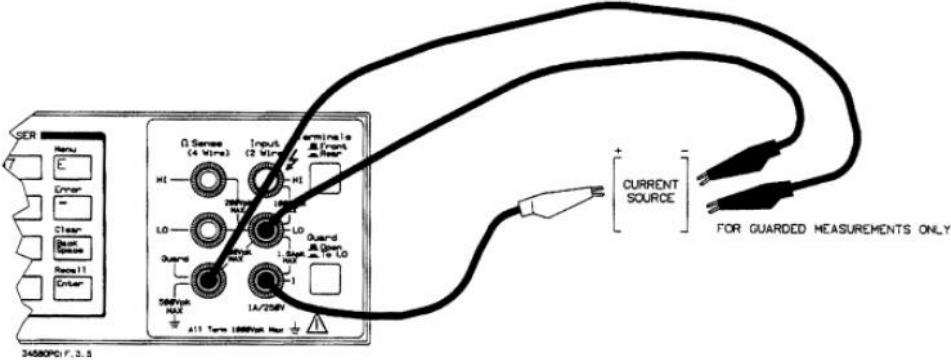


Fuente: elaboración propia.

### 3.5.1.2.4. Mediciones de corriente AC, DC

Esta forma de conexión ocurre cuando se utiliza el multímetro para medir corriente DC, AC.

Figura 9. **Conexión para medición de corriente AC/DC**

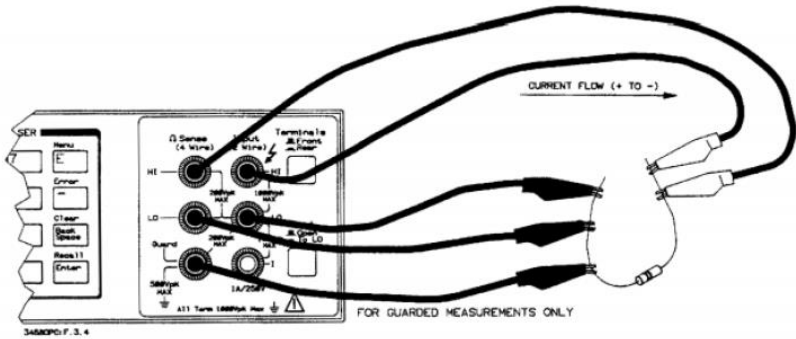


Fuente: elaboración propia.

### 3.5.1.2.5. Medición de resistencia a cuatro hilos

Esta forma de conexión ocurre cuando se utiliza el multímetro para medir resistencia a 4 hilos.

Figura 10. **Conexión para medición de resistencia a 4 hilos**



Fuente: elaboración propia.

### **3.5.2. Detector de nulos o ceros**

El detector de nulos marca JRL, modelo ND-106 (figura 11) es un dispositivo extremadamente sensible y exacto, completamente fabricado con dispositivos de estado sólido, compatible con sistemas de alta precisión y sistemas primarios de medición. Está diseñado para aplicaciones en donde los galvanómetros estándar no pueden ser utilizados por su sensibilidad inadecuada, baja impedancia de entrada y estabilidad insuficiente. A diferencia de dispositivos similares menos sensibles el ND-106 no se satura de ruido debido a la alta impedancia de entrada que enmascara señales de muy baja potencia que se necesita detectar.

El ND-106 permite medir confiablemente potenciales tan pequeños como  $\pm 0,2 \mu\text{V}$ , o aún menores ( $0,1 \mu\text{V}$ ) cuando se aplican desde una fuente de baja impedancia. La impedancia de entrada es suficientemente alta ( $100\ 000 \Omega$ ) para asegurar que la fuente de señal no se sobrecarga en la mayoría de aplicaciones.

De particular importancia es la alta estabilidad que requiere un instrumento de medición para efectuar mediciones de comparación tales como calibración o monitoreo. El ND-106 tiene una estabilidad excepcional que asegura que una medición indicada dentro del rango de entrada no variará debido a deriva del ND-106 en una cantidad mayor a  $1 \mu\text{V}$  en un período de una semana.



Figura 11. **Detector de nullos marca JRL, modelo ND-106**



Fuente: elaboración propia.

### **3.6. Procedimiento para cálculo de incertidumbre usando técnicas de medición de relación de multímetro de 8 ½ dígitos**

Las mediciones de razón se usan para calcular el valor y la precisión de un voltaje desconocido de entrada relativo a un voltaje de referencia conocido. Las mediciones de relación pueden ser fácilmente realizadas usando un multímetro digital moderno (DMM), midiendo la entrada desconocida y voltajes de referencia y usando su relación para determinar el valor exacto del voltaje desconocido de entrada.

Este procedimiento se puede realizar utilizando tres técnicas de medición de relación DMM para determinar el valor rastreable e incertidumbre de medición de una entrada desconocida. También demuestra cómo se pueden usar las técnicas de medición de razón para lograr una medición rastreable con incertidumbres que se aproximan a la estabilidad de 24 horas de un instrumento o la especificación de precisión de transferencia.

### **3.7. Tipos de procedimientos para cálculo de incertidumbre utilizando el multímetro digital de 8 ½ dígitos**

Todos los DMM realizan una medición de voltaje de CC comparando o haciendo una relación del voltaje desconocido aplicado a sus terminales de entrada al voltaje interno calibrado del instrumento de referencia. Las especificaciones de precisión de 90 días, 1 año o 2 años del instrumento pueden ser aplicados al valor medido resultante para determinar su incertidumbre rastreable.

Una medición de relación realiza esta misma comparación, pero en su lugar usa una segunda medición de un voltaje de referencia externo que generalmente se conoce a un valor mucho mayor precisión que la especificación de precisión de 90 días o más del DMM. Al hacerlo, el DMM se usa solo como un dispositivo de transferencia estable a corto plazo y, como tal, contribuirá con un error mucho menor en el resultado final de la medición.

Si el DMM contribuyó con un error cero, entonces la precisión del voltaje desconocido debe ser exactamente igual a la incertidumbre trazable del voltaje de referencia utilizado en la medición. En realidad, la contribución de error del DMM generalmente dominará la medición de incertidumbre final; sin embargo, este error puede ser significativamente menor que simplemente medir el voltaje desconocido y aplicar la especificación de precisión de 90 días o más del DMM apropiado.

Las tres formas para poder realizar el procedimiento de cálculo de incertidumbre son:

- Mediciones automáticas de la relación.

- Mediciones manuales de la relación.
- Mediciones manuales de la relación utilizando las especificaciones de precisión de transferencia del DMM.

Una vez que se determina el valor de la relación de voltaje, el valor desconocido se calcula utilizando la ecuación 1, independientemente de si se utilizaron secuencias de mediciones automatizadas o manuales para calcular el valor de la relación de voltaje.

$$\text{Ecuación 1: } V_{\text{DESCONOCIDO}} = V_{\text{REFERENCIA}} \times \text{Ratio}$$

El propósito final de usar una medición de razón es generalmente determinar el valor de incertidumbre más preciso y más bajo del voltaje desconocido de entrada. Siempre se describirá la incertidumbre de voltaje desconocida,  $U$ , resultante del uso de cualquier técnica de medición de relación siempre se describe por la siguiente relación:

[Combinación lineal de errores]

$$\text{Ecuación 2a: } U_{\text{DESCONOCIDO}} = U_{\text{REFERENCIA}} + U_{\text{RATIODEVICE}}$$

o

[Combinación RSS de errores]

$$\text{Ecuación: 2b: } U_{\text{DESCONOCIDO}} = \sqrt{U_{\text{referencia}}^2 + U_{\text{ratiodevice}}^2}$$

El error del dispositivo de relación que se muestra en la ecuación 2 anterior representa el error total aportado por el DMM al determinar el valor de relación utilizado en la ecuación 1.

El voltaje de entrada desconocido final y su incertidumbre de medición rastreable se expresa como:

### Ecuación 3: $V_{\text{DESCONOCIDO}} \pm U_{\text{DESCONOCIDO}}$

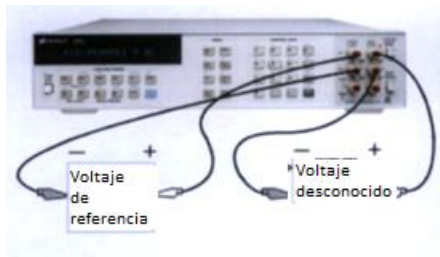
Los siguientes ejemplos de medición de relación y cálculos de error suponen que se utiliza un DMM Keysight 3458A de 8 ½ de dígitos. Sin embargo, las técnicas de medición de relación descritas se pueden aplicar a cualquier DMM con la capacidad de medición y especificación requeridas esbozada en los ejemplos a continuación.

#### 3.7.1. Mediciones automáticas de la relación utilizando el multímetro digital de 8 ½ dígitos

Algunos DMM incorporan una medición automatizada del voltaje de entrada desconocida y el voltaje de referencia aplicado para luego calcular y mostrar automáticamente el valor resultante de la relación de voltaje. Esta configuración de medición se muestra en la figura 12.

El DMM medirá automáticamente los dos voltajes aplicados utilizando la conmutación interna y luego calcula automáticamente el valor resultante de la relación de voltaje de las dos mediciones independientes.

Figura 12. **Medición automatizada**



Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Medida automática de relación 1:1 y 10:1**

<b>Medida de relación 1:1</b>		
V <sub>REFERENCIA</sub>	= 10.000020 V ± 1.5 µV o 10.000020 V ± 0.15 ppm	Valor de referencia conocido
V <sub>DESCONOCIDO</sub>	= ?	
Relación	= 1.0000025	Mostrado por DMM
V <sub>DESCONOCIDO</sub>	= 10.000020 V x 1.0000025 = 10.0000450 V ± U <sub>DESCONOCIDO</sub>	
Estimación de la incertidumbre (usando especificaciones a 24 hr para DCV del 3458A y especificaciones de medición de relación)		
U <sub>REFERENCIA</sub>	= 0.15 ppm	
U <sub>RATIODEVICE</sub>	= U <sub>DMMINPUT</sub> + 1.5 x U <sub>DMM REF INPUT</sub>	Usando el anexo 1. Ratio especificación de precisión
	= 0.55 ppm + 1.5x0.55 ppm	
	= 1.375 ppm	
U <sub>DESCONOCIDO</sub>	= 0.15 ppm + 1.375 ppm	
	= 1,53 ppm de V <sub>DESCONOCIDO</sub>	[lineal]
	= 1.38ppm de V <sub>DESCONOCIDO</sub>	[RSS]
<b>Resultado V<sub>DESCONOCIDO</sub> = 10.0000450 V ± 15.3 µV o ± 1.53 ppm</b>		
<b>Medida de relación 10:1</b>		
V <sub>REFERENCIA</sub>	= 10.000020 V ± 1.5 µV o 10.000020 V ± 0.15 ppm	
V <sub>DESCONOCIDO</sub>	= ?	
Relación	= 0.10000025	Mostrado por DMM
V <sub>DESCONOCIDO</sub>	= 10.000020 V x 0.10000025 = 1.00000450 V ± U <sub>DESCONOCIDO</sub>	
Estimación de la incertidumbre (usando especificaciones a 24 hr para DCV del 3458A y especificaciones de medición de relación)		
U <sub>REFERENCIA</sub>	= 0.15 ppm	
U <sub>RATIODEVICE</sub>	= U <sub>DMMINPUT</sub> + 1.5 x U <sub>DMM REF INPUT</sub>	Usando la Sección 9. Ratio especificación de precisión
	= 1.8 ppm + 1.5 x 0.55 ppm	
	= 2.625 ppm	
U <sub>DESCONOCIDO</sub>	= 0.15 ppm + 2.625 ppm	y DMM estabilidad las 24 horas
	= 2.78ppm del V <sub>DESCONOCIDO</sub>	[lineal]
	= 2,63ppm del V <sub>DESCONOCIDO</sub>	[RSS]
<b>Resultado: V<sub>DESCONOCIDO</sub> = 1.00000450 V ± 2.78 µV o ± 2.78 ppm</b>		

Fuente: elaboración propia.

### 3.7.2. Mediciones de relación manual utilizando el multímetro de 8 ½ dígitos

Se puede usar cualquier DMM para realizar manualmente estas dos mediciones como se muestra en la figura 13. El usuario calculará manualmente el valor de la relación de voltaje de estas dos mediciones individuales.

Figura 13. **Medición manual**



Fuente: elaboración propia.

Las especificaciones 3458A relevantes se reproducen en el anexo 1 al final de este documento.

Tabla III. **Medición de relación manual 1:1 y 10:1**

<b>Medida de relación 1: 1</b>			
$V_{REFERENCIA}$	$= 10.000020 \text{ V} + 1.5 \text{ uV}$ o $10.000020 \text{ V} \pm 0.15 \text{ ppm}$		<i>Valor de referencia conocido</i>
$V_{REFERENCIA}$	$= 9.9999980 \text{ V}$		Valor medido
$V_{DESCONOCIDO}$	$= 10.000023 \text{ V}$		Valor medido
Relación	$= 1.0000025$	relación calculada= $V_{DESCONOCIDO} / V_{REFERENCIA}$ de los valores medidos.	
$V_{DESCONOCIDO}$	$= 10.000020 \text{ V} \times 1.0000025 = 10.0000450 \text{ V} \pm U_{DESCONOCIDO}$		
<b>Estimación de incertidumbre (utilizando las especificaciones del DMM 3458A de 24 horas)</b>			
$U_{REFERENCIA}$	$= 0.15 \text{ ppm}$		
$U_{RATIODEVICE}$	$= U_{DMM INPUT} + U_{DMM REF INPUT}$		
	$= 0.55 \text{ ppm} + 0.55 \text{ ppm}$		
	$= 1.10 \text{ ppm}$		
$U_{DESCONOCIDO}$	$= 0.15 \text{ ppm} + 1.10 \text{ ppm}$		
	$= 1.25 \text{ ppm de } V_{DESCONOCIDO}$		[lineal]
	$= 1.11 \text{ ppm de } V_{DESCONOCIDO}$		[RSS]

Continuación de la tabla III.

<b>Resultado: <math>V_{\text{DESCONOCIDO}} = 10.0000450 \text{ V} \pm 12.5 \mu\text{V} \text{ o } \pm 1.25 \text{ ppm}</math></b>			
<b>Medida de relación 10: 1</b>			
$V_{\text{REFERENCIA}}$	$= 10.000020 \text{ V} + 1.5 \mu\text{V} \text{ o } 10.000020 \text{ V} \pm 0.15 \text{ ppm}$		<i>Valor de referencia conocido</i>
$V_{\text{REFERENCIA}}$	$= 9.9999980 \text{ V}$		Valor medido
$V_{\text{DESCONOCIDO}}$	$= 1.0000023 \text{ V}$		Valor medido
relación	$= 0.10000025$	Proporción calculada = $V_{\text{DESCONOCIDO}} / V_{\text{REFERENCIA}}$ de los valores medidos.	
$V_{\text{DESCONOCIDO}}$	$= 10.000020 \text{ V} \times 0.10000025 = 1.00000450 \text{ V} \pm U_{\text{DESCONOCIDO}}$		
<b>Cálculo de incertidumbre (utilizando las especificaciones del DMM 3458A DCV de 24 horas)</b>			
$U_{\text{REFERENCIA}}$	$= 0,15 \text{ ppm}$		
<b><math>V_{\text{DESCONOCIDO}}</math> medido en el rango 1 V del DMM</b>			
$U_{\text{RATIODEVICE}}$	$= U_{\text{DMMINPUT}} + U_{\text{DMM REF INPUT}}$		
	$= 1.8 \text{ ppm} + 0.55 \text{ ppm}$		
	$= 2,35 \text{ ppm}$		
$U_{\text{DESCONOCIDO}}$	$= 0.15 \text{ ppm} + 2.35 \text{ ppm}$		
	$= 2.50 \text{ ppm de } V_{\text{DESCONOCIDO}}$		[lineal]
	$= 2.36 \text{ ppm del } V_{\text{DESCONOCIDO}}$		[RSS]
$V_{\text{DESCONOCIDO}} = 1.00000450 \text{ V} \pm 2.50 \mu\text{V} \text{ o } \pm 2.50 \text{ ppm}$ medido en el rango de 1V			
<b><math>V_{\text{DESCONOCIDO}}</math> medido en el rango 10 V del DMM</b>			
$U_{\text{RATIODEVICE}}$	$= U_{\text{DMMINPUT}} + U_{\text{DMM REF INPUT}}$		
	$= 1.0 \text{ ppm} + 0.55 \text{ ppm}$		
	$= 1.55 \text{ ppm}$		
$U_{\text{DESCONOCIDO}}$	$= 0.15 \text{ ppm} + 1.55 \text{ ppm}$		
	$= 1.70 \text{ ppm de } V_{\text{DESCONOCIDO}}$		[lineal]
	$= 1.56 \text{ ppm de } V_{\text{DESCONOCIDO}}$		[RSS]
$V_{\text{DESCONOCIDO}} = 1.00000450 \text{ V} \pm 1.70 \mu\text{V} \text{ o } \pm 1.70 \text{ ppm}$ medido en el rango de 10 V			

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Mediciones manuales de la relación 1:1 y 10:1 utilizando las especificaciones de precisión de transferencia del DMM**

<b>Medida de relación 1: 1</b>			
$V_{\text{REFERENCIA}}$	$= 10.000020 \text{ V} \pm 1.5 \mu\text{V} \text{ o } 10.000020 \text{ V} \pm 0.15 \text{ ppm}$		<i>Valor de referencia conocido</i>
$V_{\text{REFERENCIA}}$	$= 9.9999980 \text{ V}$		Valor medido
$V_{\text{DESCONOCIDO}}$	$= 10.000023 \text{ V}$		Valor medido
Proporción	$= 1.0000025$	relación calculada = $V_{\text{DESCONOCIDO}} / V_{\text{REFERENCIA}}$ de los valores medidos.	

Continuación de la tabla IV.

$V_{DESCONOCIDO}$	$= 10.000020 \text{ V} \times 1.0000025 = 10.0000450 \text{ V} \pm U_{DESCONOCIDO}$		
estimación de incertidumbre (utilizando las especificaciones y condiciones de precisión de transferencia DMM 3458A)			
$U_{REFERENCIA}$	$= 0.15 \text{ ppm}$		
$U_{RATIODEVICE}$	$= U_{DMMINPUT} + U_{DMM REF input}$		
	$= 0.10 \text{ ppm} +$ $0.10 \text{ ppm}$		
	$= 0.20 \text{ ppm}$		
$U_{DESCONOCIDO}$	$= 0.15 \text{ ppm} +$ $0.20 \text{ ppm}$		
	$= 0.35 \text{ ppm del } V_{DESCONOCIDO}$		[lineal]
	$= 0.25 \text{ ppm del } V_{DESCONOCIDO}$		[RSS]
<b>Resultado: <math>V_{DESCONOCIDO} = 10.0000450 \text{ V} \pm 3.5 \mu\text{V} \text{ o } \pm 0.35 \text{ ppm}</math></b>			
<b>Medida de relación 10: 1</b>			
$V_{REFERENCIA}$	$= 10.000020 \text{ V} \pm 1.5 \mu\text{V} \text{ o } 10.000020 \text{ V} \pm 0.15 \text{ ppm}$		<i>Valor de referencia conocido</i>
$V_{REFERENCIA}$	$= 9.9999980 \text{ V}$		Valor medido
$V_{DESCONOCIDO}$	$= 1.0000023 \text{ V}$		Valor medido
relación	$=$ $0.10000025$	Proporción calculada = $V_{DESCONOCIDO} / V_{REFERENCIA}$ de los valores medidos.	
$V_{DESCONOCIDO}$	$= 10.000020 \text{ V} \times 0.10000025 = 1.00000450 \text{ V} \pm U_{DESCONOCIDO}$		
Cálculo de incertidumbre (utilizando las especificaciones y condiciones de precisión de transferencia DMM 3458A)			
$U_{REFERENCIA}$	$= 0,15 \text{ ppm}$		
$U_{RATIODEVICE}$	$= U_{DMMINPUT} + U_{DMM REF INPUT}$		
	$= 0.55 \text{ ppm} +$ $0.10 \text{ ppm}$		
	$= 0.65 \text{ ppm}$		
$U_{DESCONOCIDO}$	$= 0.15 \text{ ppm} +$ $0.65 \text{ ppm}$		
	$= 0.80 \text{ ppm de } V_{DESCONOCIDO}$		[lineal]
	$= 0.67 \text{ ppm de } V_{DESCONOCIDO}$		[RSS]
$V_{DESCONOCIDO} = 1.00000450 \text{ V} \pm 0.80 \mu\text{V} \text{ o } \pm 0.80 \text{ ppm}$			

Fuente: elaboración propia.



La siguiente tabla resume los resultados de la medición de la relación descrita en los ejemplos anteriores. Las mediciones de relación más precisas se logran cuando los voltajes desconocidos y de referencia son similares, como se demuestra en las muestras de medición de relación 1:1. Los errores de medición aumentarán al aumentar los valores de relación; por ejemplo, una medición de relación de 10:1 tendrá mayor incertidumbre que una medición de relación de 1:1.

De manera similar, el error de medición se minimizará cuando se pueda tomar el mayor cuidado para eliminar los errores contribuidos por el instrumento al realizar manualmente las mediciones de relación o al utilizar procedimientos de medición de transferencia de grado metrológico, como se demostró en el ejemplo 3 donde se utilizaron las especificaciones de precisión de transferencia del 3458A.

Tabla V. **Comparación de medidas de relación**

Estimación de incertidumbre	Medida de relación 10:1 (incertidumbre ppm)				Medida de relación 1:1 (incertidumbre ppm)		
	Automático	Manual		Transferencia Manual	Automático	Manual	Transferencia Manual
		rango 1V	rango 10V				
Linear	2,78	2,50	1,70	0,80	1,53	1,25	0,35
RSS	2,63	2,36	1,56	0,67	1,38	1,11	0,25

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Procedimiento para el mantenimiento de la unidad de tensión utilizando el detector de nulos JRL, modelo ND-106

En el orden local, el patrón primario de fuerza electromotriz es mantenido por un grupo de celdas patrón saturadas. Muchos laboratorios usan grupos que contienen desde 3 a 6 celdas mantenidas a temperatura controlada en un baño de aceite o de aire. Las celdas son generalmente calibradas en un instituto metrológico internacional de mayor jerarquía, a intervalos periódicos, y la fem media del grupo se considera constante entre calibraciones. Como tales calibraciones no son muy frecuentes (a intervalos de un año o más), deben ser empleadas algunas técnicas para el mantenimiento y vigilancia de la unidad local entre calibraciones.

Comenzando con los valores, asignados a cada celda del grupo como un conjunto dado de puntos de referencia, se puede comprobar la relativa estabilidad de las celdas por medición de las diferencias entre ellas. Se podrían medir todas las posibles diferencias y tener igual precisión si los valores de todas las celdas son conocidos como también comparar una celda favorita y compararla con todas las demás (pero esto consigue alta precisión en la celda

conocida y relativamente baja precisión en todas las demás). Para grupos pequeños, resulta práctica la medición de todas las posibles diferencias, pero con el tamaño del grupo se aumenta el número de mediciones y se aumenta rápidamente con  $n$ , donde  $n$  es el tamaño del grupo. Como  $n$  aumenta, compromete esquemas que dan igual precisión en el conocimiento de que todas las celdas pueden ser usadas.

El procedimiento sugerido está diseñado para dar información sobre:

- La estabilidad sobre las diferencias en las fem del grupo.
- Los componentes de variabilidad y dependencia de la precisión del proceso de medición sobre influencias ambientales o cambios en el procedimiento.
- Posibles errores sistemáticos y estimación de la exactitud del proceso.

### **3.8.1. Técnica de medición**

El método por oposición es el comúnmente utilizado en la intercomparación de las celdas patrón saturadas. En este método las pequeñas diferencias entre dos celdas conectadas en oposición serie son medidas utilizando un instrumento apropiado, generalmente un potenciómetro, diseñado para la medición de muy pequeñas fems.

En la situación ideal, la diferencia en fem, que es medida por el potenciómetro, es:

$$\Delta E = V_1 - V_2 \quad (1)$$

Donde  $V_1$  y  $V_2$ , son las fems de las dos celdas a ser comparadas.

No obstante, en una situación real existen fems parásitas en el circuito. En general, estas pueden ser clasificadas en dos categorías:

- Las que permanecen constantes o relativamente constantes cuando toda la medición es hecha.
- Las que varían rápidamente (referenciadas al intervalo completo del conjunto de mediciones).

Si las fems son del segundo tipo, tienen el efecto de disminuir la precisión del proceso. Si son del primer tipo, introducen un error sistemático haciendo que la medición sea:

$$\Delta E = V_1 - V_2 + P \quad (2)$$

Donde  $P$  es la fem constante. Es posible estimar  $P$  tomando una segunda medición:

$$\Delta E' = V_2 - V_1 + P \quad (3)$$

Y sumando las dos:

$$2P = \Delta E + \Delta E' \quad (4)$$

La diferencia entre las dos ecuaciones (2) y (3) da:

$$\Delta E - \Delta E' = 2(V_1 - V_2) \quad (5)$$

Un estimado de  $V_1 - V_2$  libre de P. El par de ecuaciones {ecs. (2) y (3) se dicen de balanceo izquierda- derecha}, esto es que, si hay un efecto posicional, el balanceo lo coloca fuera del resultado final. Esta técnica es análoga a la utilizada para eliminar la desigualdad del equilibrio pesando en una balanza de brazo de dos sartenes. Para designar las posiciones de las celdas desde el punto de vista operacional, frecuentemente son designados como desconocidos y referencia: los terminales de entrada del instrumento de medición son como se muestra en la figura 14 en la siguiente sección, el principio de equilibrio izquierda-derecha se extenderá a grupos que contengan tres o más celdas.

### 3.8.2. Diseño para grupos de 3 y 4 celdas

Estos diseños han sido seleccionados por ser: 1) eficientes desde el punto de vista práctico al efectuarse las mediciones; 2) estadísticamente eficientes por presentar una mínima desviación estándar para los valores estimados de las celdas; 3) relativamente fáciles de analizar mediante una calculadora convencional de escritorio. Estos análisis presentados son solución de mínimos cuadrados para el diseño asociado, asumiendo que la suma de las diferencias de la media de todas es cero. Para los grupos de 3 y 4 celdas, el balance total de izquierda-derecha es estimado y su efecto es:

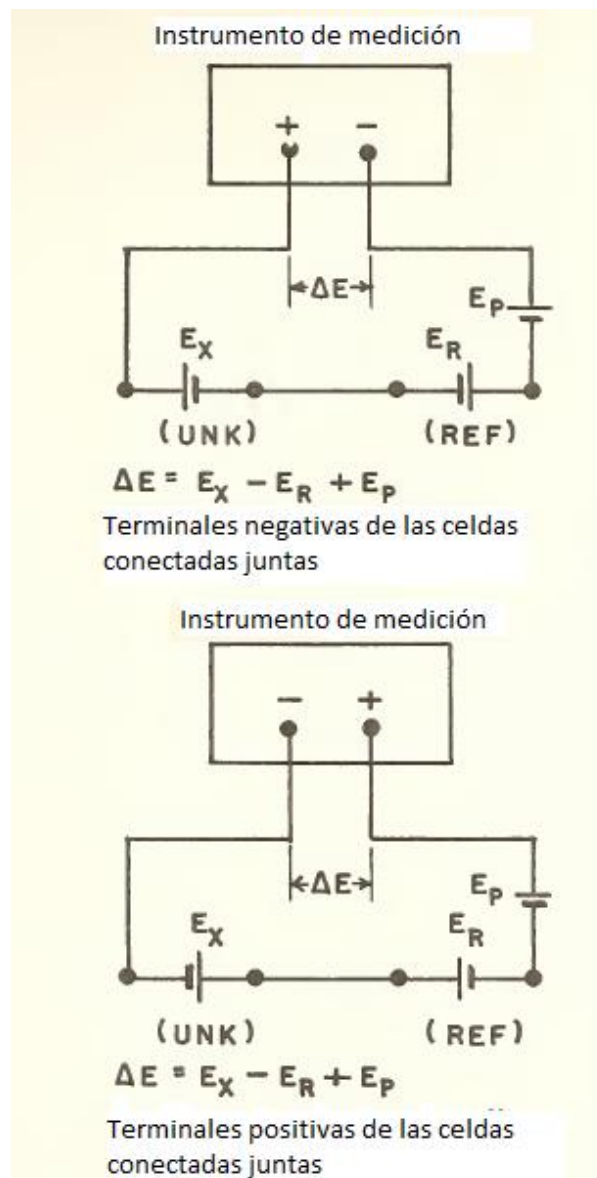
$$P = 1/n \sum_{i=1}^n Y_i$$

Donde n es el número de mediciones y  $Y_i$  la diferencia observada de fem entre dos celdas.

Para cada grupo de tamaño, el diseño y su análisis se dan como una entidad completa, con la mitad izquierda dando el procedimiento general y la mitad

derecha un ejemplo numérico. El orden sugerido para realizar las mediciones requiere mover un conjunto de cables a la vez, minimizando así la posibilidad de conectar las celdas equivocadas.

Figura 14. **Conexión oposición serie**



Fuente: elaboración propia.

Las definiciones de los símbolos utilizados en las tablas son las siguientes:

Símbolo:	Definición:
$V_i$	La fem de la celda $i$ -ésima
$M$	La media del grupo
$M^*$	La media de
$V_i$	La diferencia $V_i - M$
$Y_i$	La $i$ -ésima diferencia medida
$P$	El circuito residual calculado
$Q_i$	Una suma de las $y$ 's que involucran la celda $i$ -ésima
$V_i^*$	El $i$ -ésimo $v$ calculado
$Y_i^*$	La $y_i$ predicha calculado a partir de $v^*$ y $P$
$d_i$	Desviaciones, $(y_i - y^*)$
$s$	La desviación estándar de una sola observación

Para los diseños dados se supone que la media del grupo es conocida y sirve como restricción en la solución de mínimos cuadrados. El análisis reporta la siguiente información:

- La fem de cada celda (o la diferencia de la media del grupo)
- La fem residual,  $P$
- La desviación estándar de una simple observación
- La desviación de cada observación del valor esperado

La frecuencia con que estas intercomparaciones deben hacerse puede variar considerablemente, dependiendo de la instalación particular. Sin embargo, si se ha establecido un proceso de control, una intercomparación cada semana sería suficiente.

### 3.8.3. Cambio de restricción

En la sección anterior se asume que se conoce la media para todo el grupo, como sería el caso si el Centro Nacional de Metrología hubiera asignado valores al grupo. Porque solo se miden las diferencias en fem, este valor promedio es la restricción de los valores que proporcionan el punto cero con el que están relacionados los valores de celda.

Cuando una o más de las celdas muestran un cambio tan grande como para ser inconsistentes con su asignado valor, se hace necesario eliminar estas celdas del grupo de definición. Evidencia de tales cambios pueden ser descubiertos de los cuadros de control en cualquiera de los valores de celda o gráficos de control sobre diferencias entre celdas (ver la sección de gráficos de control).

Para ilustrar, supongamos que los valores asignados para la quinta y sexta celdas fueran 1,0182536 y 1,0182501 en lugar de los valores (1,0182416, 1,0182381). Este es un cambio de + 12,0  $\mu\text{V}$  en cada celda así que los nuevos valores de fem para las celdas serían como se muestra en la tabla VI.

Tabla VI. **Cambio de valores de celdas 5 y 6**

Celda	Valor asignado	$V_i - M$	Fem de la celda $M + V_i^*$	Diferencia de lo asignado
1	1,0182605	10,47	1,01826445	3,95
2	2655	15,62	1,01826960	4,10
3	2466	-3,40	1,01825058	3,98
4	2476	-2,29	1,01825169	4,09
5	2536*	-8,37	1,01824561	-7,99
6	2501*	-12,04	1,01824194	-8,16

Fuente: elaboración propia.



Promedio = 1,01825398 = M

Estos valores difieren por 12  $\mu\text{V}$  de los datos originales.

Las últimas 2 celdas son inconsistentes con sus valores asignados, así que esos son los valores que se deben retirar de la restricción, y establecer la zona cero con las primeras cuatro celdas.

Para hacer esto se calcula:

- $V_{A^*}$ : el promedio del valor asignado de las celdas a ser consideradas en la restricción como se muestran en la columna 2 fila promedio  $V_A$  de la tabla VII.
- $V_{i^*}$ : la celda calculada como se muestra en la sección cambio de restricción y copiada en la columna 3 de la tabla de abajo.

Agregar  $V_{A^*}$  a cada uno de los  $V_{i^*}$  para dar los valores de la celda,  $V_{i^*}$ , como se muestra en la columna 4.

Tabla VII. **Nuevo promedio**

Celda	Valor asignado	$V_i - M$	Fem de la celda $V_{A^*} + V_i = V_{i^*}$
1	1,0182605	10,47	1,01826042
2	2655	15,62	1,01826557
3	2466	-3,40	1,01824655
4	2476	-2,29	1,01824766
Promedio =	1,01825505= $V_A$		
5	1,018 2536	-8,37	1,01824158
6	2501	-12,04	1,01823792

Fuente: elaboración propia.

Los valores de las celdas se expresan ahora en términos del promedio de las celdas buenas como punto de referencia. Las celdas que se comportan mal normalmente se seguirían midiendo con la esperanza de que se estabilizarán en algún valor nuevo.

### 3.8.4. Intercomparación de un grupo de tres celdas patrón

Dado que las fems de tres celdas patrón ( $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$ ) son asignadas por su calibración en términos de un patrón conocido, la media del grupo es:

$$M = 1/3 \sum_{i=1}^3 V_i$$

Y la diferencia de la media de cada celda es:

$$V_i = (V_i - M)$$

Ejemplo de valores de un certificado de laboratorio del NIST:

$$V_1 = 1,0182571 \quad v_1 = -1,2 \mu V$$

$$V_2 = 1,0182535 \quad v_2 = -4,8 \mu V$$

$$V_3 = 1,0182643 \quad v_3 = +6 \mu V$$

$$\text{Media} = 1,0182583 \quad \text{Suma} = 0$$

Suponiendo que existe una pequeña y constante fem  $P$  asociada con el proceso de medición, entonces el valor esperado de una observación es:

$$E(y_i) = V_j - V_k + P \quad j=k \text{ para } k = 1,2,3$$

Para todo valor posible de j y k el siguiente esquema de medición es conveniente y necesita cambiar de conexión a una celda solamente una vez.

Tabla VIII. **Esquema de medición**

Medición	Posición celda Desconocida	Posición celda Referencia
Y1	1	2
Y2	1	3
Y3	2	3
Y4	2	1
Y5	3	1
Y6	3	2

2. Observaciones	
Y1	= +4.8 $\mu$ V
Y2	= -6.6 $\mu$ V
Y3	= -10.6 $\mu$ V
Y4	= -3.4 $\mu$ V
Y5	= +7.4 $\mu$ V
Y6	= +10.4 $\mu$ V

Fuente: elaboración propia.

Ver la figura 11 para definición de posición.

Estimación de P:  $P = 1/6 (+ 4.8 - 6.6 - 10.6 - 3.4 + 7.4 + 10.4)$

$$P = 1/6 \sum_{i=1}^6 Y_i$$

P=0.333  $\mu$ V

Estimación de vi:

$$\begin{aligned} V1 = V1 - M &= 1/6 (y1 + y2 - y4 - y5) & v1 &= 1/6 (4.8 - 6.6 + 3.4 - 7.4) = -0.967 \\ V2 = V2 - M &= 1/6 (-y1 + y3 + y4 - y6) & v2 &= 1/6 (-4.8 + 10.6 + 3.4 - 10.4) = -4.867 \\ V3 = V3 - M &= 1/6 (-y2 - y3 + y5 + y6) & v3 &= 1/6 (-6.6 - 10.6 + 7.4 + 10.4) = +5.833 \end{aligned}$$

Prueba aritmética =  $\sum V_i = 0$       Prueba =  $-0.967 - 4.867 + 5.833 = -0.001 \mu$ V

Cálculo de y:

$$\begin{aligned}y_1 &= v_1 - v_2 + P & y_1 &= - 0.967 + 4.867 + 0.333 = +4.233 \\y_2 &= v_1 - v_3 + P & y_2 &= - 0.967 - 5.833 + 0.333 = -6.467 \\y_3 &= v_2 - v_3 + P & y_3 &= - 4.867 - 5.833 + 0.333 = -10.367 \\y_4 &= v_2 - v_1 + P & y_4 &= - 4.867 + 0.967 + 0.333 = -3.567 \\y_5 &= v_3 - v_1 + P & y_5 &= +5.833 + 0.967 + 0.333 = + 7.133 \\y_6 &= v_3 - v_2 + P & y_6 &= +5.833 - 4.867 + 0.333 = + 11.033\end{aligned}$$

$$\text{Prueba aritmética} = \sum y_i = 6P$$

$$\text{Prueba} = \sum y_i = 1,998$$

Cálculo de desviaciones ( $d_i = Y_i - y_i$ ):

$$\begin{aligned}d_1 &= Y_1 - y_1 & d_1 &= 4.8 - 4.233 = 0.567 \mu\text{V} \\d_2 &= Y_2 - y_2 & d_2 &= -6.6 + 6.467 = -0.133 \mu\text{V} \\d_3 &= Y_3 - y_3 & d_3 &= -10.6 + 10.367 = -0.233 \mu\text{V} \\d_4 &= Y_4 - y_4 & d_4 &= -3.4 + 3.567 = + 0.167 \mu\text{V} \\d_5 &= Y_5 - y_5 & d_5 &= 7.4 - 7.133 = +0.267 \mu\text{V} \\d_6 &= Y_6 - y_6 & d_6 &= 10.4 - 11.033 = -0.633 \mu\text{V}\end{aligned}$$

$$\text{Prueba} = \sum_{i=1}^6 d_i^2 \quad \sum d = 0.002$$

La desviación estándar de una sola observación es:

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^6 d_i^2} \quad s = \sqrt{\frac{0,8933}{3}} = 0,55 \mu\text{V}$$

Donde 3 representa el número de grados de libertad en el estimativo del error.

Los valores de las fems de todas las celdas se calculan restituyendo el valor medio dado:

$$V_i: v_i + M$$

La media (ver sección 1): 1,01825830

$$V1 = 1,01825830 - 0,00000097 = 1,01825733$$

$$V2 = 1,01825830 - 0,00000487 = 1,01825343$$

$$V3 = 1,01825830 - 0,00000583 = 1,01826413$$

### **3.9. Procedimiento recomendado por el fabricante de las celdas para conocer la tensión en función de la temperatura del horno**

Este procedimiento ocurre como se explica a continuación.

#### **3.9.1. Voltaje de celda**

Se proporciona en un certificado con el SCO 106 (figura 15). La calibración original se realizó a cuatro cifras significativas de temperatura utilizando el equipo de monitoreo de temperatura del SCO 106 certificado. Se especifica que la estabilidad de temperatura a largo plazo del horno está dentro de  $\pm 0,05$  grados Celsius. Dentro de este rango, el voltaje de la celda puede cambiar  $\pm 3$  microvoltios.

Este cambio puede determinarse y aplicarse una corrección adecuada mediante la operación del equipo de monitoreo de temperatura. Debido a que la estabilidad de este monitor extremadamente preciso es considerablemente mayor que la calibración absoluta del dial de temperatura, el monitor puede medir los cambios de temperatura con una precisión inusualmente alta. De esta manera, el certificado se puede extender con precisión para cualquier temperatura normal del horno.

### 3.9.2. Monitoreo de temperatura

Permite medir la temperatura de la caja dentro de 0,005 grados Celsius. Para monitorear la temperatura de las celdas estándar.

- Paso 1. Conectar un galvanómetro sensible de alta impedancia a los terminales GALV- y GALV + del panel, utilizando un cable blindado. Conecte el blindaje al terminal GND.

Nota: el terminal GND está conectado internamente al terminal GND en el panel trasero.

- Paso 2. Girar con cuidado la perilla del monitor de temperatura para obtener una lectura nula en el galvanómetro.
- Paso 3. Leer la temperatura del horno directamente debajo de la línea de índice.
- Paso 4. Consultar el certificado para obtener la temperatura de certificación y calcular la diferencia de temperatura. Ejemplo:
  - Temperatura actual del horno: 36,960
  - Menos: temperatura de certificación: 37,000
  - Diferencia – 0,040
- Paso 5. Multiplicar el coeficiente de temperatura de la celda estándar (-64,4  $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$ ) por la diferencia de temperatura para obtener la diferencia de voltaje. Ejemplo:  $(-64,4) * (-0,04) = + 2.576 \mu\text{V}$
- Paso 6. Agregue algebraicamente la diferencia de voltaje al voltaje certificado. Ejemplo:
  - Voltaje certificado: 1,0179258
  - Tensión diferencial: +0,0000026 (2,57 $\mu\text{V}$ )

1,0179232 voltios

### **3.9.3. Comparaciones de voltaje de celda de registro**

Es aconsejable de forma diaria, semanal o mensual. Proceder de la siguiente forma:

- Paso 1. Con alambre de cobre, unir los terminales negativos de las celdas (-1, -2 y -3) juntos.
- Paso 2. Con alambre de cobre, conectar un galvanómetro o micro voltímetro calibrado sensible a alta impedancia entre los terminales 1+ y 2+ y lea la diferencia de voltaje. Ingresar la lectura en un registro.
- Paso 3. Compare de manera similar las celdas 1 y 3 y 2 y 3.

Precaución: para obtener lecturas consistentes de una medición a la siguiente, utilizar siempre la misma celda como referencia y conectar el lado negativo (bajo) del galvanómetro a esa celda. Si se ignora esta precaución y se invierte la polaridad de un conjunto de lecturas al siguiente, se notarán cambios de voltaje erróneamente grandes.

- Paso 4. Quitar la conexión entre los tres terminales negativos de las celdas estándar.

Figura 15. **Patrón de tensión continua SCO 106**



Fuente: elaboración propia.





## CONCLUSIONES

1. Se elaboró un procedimiento para monitoreo de la referencia de tensión directa usando la técnica de intercomparación entre las celdas, el cual servirá para asegurar la trazabilidad metrológica del laboratorio.
2. Se documentó el procedimiento para cálculo de incertidumbre utilizando técnicas de medición de relación y multímetro digital de 8 ½ dígitos de resolución, el cual servirá para poder realizar la diseminación del volt hacia otras celdas.
3. Se comprobó que las mediciones de relación más precisas se logran cuando los voltajes desconocidos y de referencia son similares, como se demuestra en las mediciones de relación 1:1.
4. Se comprobó que el error de medición se minimizará al realizar manualmente las mediciones de relación o al utilizar procedimientos de medición de transferencia de grado metrológico, es decir utilizando las especificaciones de precisión de transferencia del 3458A.
5. Se realizó inventario y diagnóstico de los equipos con los que cuenta el laboratorio y con base en ello se realizan algunas recomendaciones para el reemplazo o adquisición de nuevo equipo que ayude a mantener la trazabilidad metrológica del laboratorio
6. Se concluye que, a pesar de haber varios procedimientos para comprobar la estabilidad de las celdas a largo plazo, los tres ayudan a garantizar que

la tensión que indica el patrón es la correcta y también ayudan a detectar cuándo es tiempo de realizar una nueva calibración al patrón de tensión.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar una medición de temperatura del horno de la celda SCO-106 para corroborar la tensión en función de la ecuación que brinda el fabricante.
2. Reparar el multímetro de alta precisión Agilent 3458A o si fuera posible la adquisición de uno nuevo siempre conservando la misma resolución de 8 ½ dígitos.
3. Adquirir un nuevo set de celdas patrón de tensión DC, debido a que el equipo actual, a pesar de aún funcionar, ya cumplió su vida útil, y para garantizar la calidad de las mediciones es necesario contar con un patrón más moderno. Para reemplazar las celdas actuales se recomienda el modelo 732C. El estándar de referencia CC 734C de Fluke Calibration es una referencia de CC que cumple la directiva RoHS y se utiliza para mantener la tensión en laboratorios de certificación primaria y secundaria.
4. Se trata de cuatro estándares de CC 732C mecánicamente independientes en una carcasa con la anchura de bastidor. Cada 732C ofrece salidas de 10 V, 1 V y 0,1 V, y pueden transportarse fácilmente a lugares remotos mientras se mantiene la referencia en el laboratorio. Los modelos básicos proporcionan una estabilidad de  $\pm 2 \mu\text{V/V}$  al año para una salida de 10 V,  $\pm 3 \mu\text{V/V}$  al año para una salida de 1 V y  $\pm 9,8 \mu\text{V/V}$  al año para una salida de 0,1 V. Fluke Calibration también ofrece modelos seleccionados, dos veces más estables que los modelos básicos de 10 V. Cada salida de 10 V puede conducir hasta 12 mA de corriente para simplificar su uso con instrumentos de baja impedancia de entrada.

5. El estándar de referencia CC 734C se diseñó inicialmente para laboratorios que necesitan mantenerla trazabilidad de las normas nacionales y distribuir tensión en centros de producción y de servicios, laboratorios de calibración u otros lugares remotos. Para simplificar su entrega, el estándar 732C es pequeño y fácilmente transportable. Además, cuentan con una batería de 72 horas de duración que puede ampliarse a más de 210 horas con la batería externa y el cargador, por lo que resulta muy práctico viajar con un 732C por toda la ciudad o por todo el mundo.
  
6. Los cuatro 732C del estándar de referencia 734C se basan en la arquitectura que se utilizó por primera vez en el popular estándar de tensión CC 732A. Por lo tanto, se puede confiar en que proporcionará la misma alta estabilidad y deriva predecible que se espera de este equipo, en un paquete más pequeño y más portátil idéntico al del estándar de tensión CC 732B. El 734C también es compatible con los estándares CC 732B y admite todas las combinaciones de los modelos 732 B y C. Del mismo modo, también puede utilizar un 734B con los estándares 732C más recientes para obtener la máxima flexibilidad y optimizar el uso de activos. Las especificaciones técnicas de este modelo se muestran en el anexo 2
  
7. Intercomparar con el centro nacional de metrología para garantizar la trazabilidad metrológica del Laboratorio de Metrología del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII).

## BIBLIOGRAFÍA

1. CAMERON, W. G. *Designs for Surveillance of the Volt Maintained by a Small Group of Saturated Standard Cells*. New York, United States: NBS, 1967. 415 p.
2. Centro Español de Metrología. *Vocabulario internacional de metrología*. Madrid, España: Autor, 2012. s/p.
3. \_\_\_\_\_. *Vocabulario internacional de metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. Madrid, España: Autor, 2012. s/p.
4. Comisión Guatemalteca de Normas. *Norma Guatemalteca NTG/JCGM 200:2008. Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM)*. Ciudad de Guatemala: Coguanor, 2008. s/p.
5. Keysight Technologies. *Calculating uncertainty using digital multimeter ratio measurement techniques*. Virginia, United States: Author, s.f. s/p.
6. Laboratorio de Metrología Rodolfo Koenigsberger. *Registros de lecturas de patrón de tensión directa*. Ciudad de Guatemala: USAC, 1975. 80 p.

7. ROCÍO, M. y MARBÁN, J. A. *Metrología para no metrologos*. Segunda Edición. Madrid, España: Autores, 2002. 172 p.
8. Wikipedia. *Efecto Josephson*. [en línea]. <[https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_Josephson](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Josephson)>. [Consulta: enero de 2022].
9. \_\_\_\_\_. *Efecto Túnel*. [en línea]. <[https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_t%C3%BAnel](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_t%C3%BAnel)>. [Consulta: enero de 2022].

## APÉNDICES

### Apéndice 1. Registro de voltajes de celdas patrones SCO-106

REGISTRO DE VOLTAJES DE CELDAS PATRONES SCO-106					
Em = 1,017703766 V					
valores certificados	Celda 1	Celda 2	Celda 3		
1974-08-31	1,0176802	1,0176795	1,017679	t = 37,058 C	
1975-08-18	1,0177035	1,0177047	1,0177031	t = 36,997 C	
Fecha	Diferencias $\mu$ V				
	1-2	1-3	2-3		
1974-08-31	0,7	1,2	0,5	37,058	
1975-08-18	-1,2	0,4	1,6	36,997	
1975-09-23	-1,1	0,4	2,2	37,02	
1975-09-24	-1,7	0,1	2,9	37,017	
1975-09-25	-1,7	1,4	3,4	37,106	
1975-09-26	-2,5	-0,3	3,0	37,106	
1975-09-29	-2,1	-0,3	2,3	37,019	
1975-09-30	-2,5	-0,7	1,9	37,022	
1975-10-01	-1,6	-0,4	2,1	37,02	
1975-10-02	-2,1	-0,6	1,9	37,017	
1975-10-03	-2	-0,4	1,8	37,019	
1975-10-04	-2,1	-0,8	1,5	37,018	
1975-10-08	-1,9	-1,1	1,3	37,019	
1975-10-11	-1,9	-0,8	1,2	37,02	
1975-10-18	-1,4	-0,5	1,4	37,017	
1975-10-24	-1,8	-0,7	1,5	37,015	
1975-10-30	-1,5	-0,3	1,7	37,017	
1975-11-07	-1,4	-0,3	1,6	37,02	
1975-11-24	-1,3	0,1	1,9	37,017	
1976-01-06	-1,3	-0,3	1,8	37,017	
1976-02-02	-1,8	-0,2	1,6	37,019	
1976-02-26	-1,6	-0,2	1,6	37,025	
1976-03-29	-1,4	0	1,7	37,025	
1976-04-30	-1,3	0,2	1,8	37,018	
1976-06-01	-1,1	0,1	1,7	37,025	
1976-06-23	-1	0,2	1,7	37,023	
1976-08-03	-0,9	0,5	1,6	37,025	
1976-09-13	-0,8	0,4	1,6	37,023	
1976-10-06	-0,6	0,6	1,6	37,026	



Continuación del apéndice 1.

1976-11-03	-1,3	-0,3	1	37,026
1976-11-04	-0,7	0,1	1,4	37,02
1977-01-05	-0,5	0,3	1,2	37,022
1977-02-02	-0,7	0	1	37,021
1977-03-01	-0,7	0,1	1	37,018
1977-04-11	0	0,6	1,4	37,021
1977-05-11	-0,1	0,6	1,1	37,021
1977-06-07	-0,2	0,3	1,1	37,018
1977-07-14	-0,3	0,2	0,9	37,027
1977-08-12	-0,1	0,3	0,9	37,02
1977-09-05	-0,1	0,2	0,5	37,024
1977-10-05	-0,4	0,2	0,6	37,027
1977-11-04	-0,4	0,1	0,8	37,023
1978-01-13	-0,1	-0,2	0,6	37,02
1978-03-08	-0,1	0	0,3	37,02
1978-05-23	0,2	0,8	0,9	37,027
1978-07-25	0,4	1,5	1,6	37,023
1978-08-09	0,3	1,1	1,2	37,021
1978-09-13	0,4	0,8	0,6	37,021
1978-11-10	0,7	0,5	0,4	37,026
1978-11-30	1	0,1	0,5	37,03
1979-01-08	-0,8	0,2	1,2	37,025
1979-02-06	0,4	0,7	0,6	37,024
1979-04-02	0,2	0,4	0	37,039
1979-04-16	0,3	0,2	-0,2	37,033
1979-05-14	1,1	1	0,3	37,032
1979-06-20	0,8	0,8	0	37,038
1979-08-01	0,7	1,4	0,8	37,035
1979-10-05	0,8	0,6	0,5	37,031
1979-11-03	0,9	0,3	0,2	37,04
1980-01-04	0,2	0	0,3	37,037
1980-02-20	0,4	0,6	0,1	37,043
1980-03-19	0,8	1,1	0,7	37,04
1980-05-24	0,6	1,2	0,8	37,043
1980-08-13	0,1	1,1	0,6	37,057
1980-09-04	1,2	1,5	0,9	37,047
1980-10-03	1	1,4	0,9	37,045
1980-12-22	1,7	1,5	1	37,048
1981-01-15	0,7	1,3	0,9	37,057
1981-03-05	0,2	0,8	0,7	37,037
1981-04-01	0,4	0,9	0,7	37,037
1981-04-27	1,1	1,1	0,8	37,038
1981-05-27	0,7	1	0,4	37,03

Continuación del apéndice 1.

1981-07-13	0,5	0,9	0,5	37,032
1981-08-12	0,1	0,2	0,2	37,033
1981-09-16	0,7	0,3	0,7	37,033
1981-10-19	0,6	0,4	0	37,031
1981-11-13	0,5	0,5	0,2	37,035
1982-01-07	0	0,3	0,4	37,035
1982-02-08	0,3	0,6	0,1	37,037
1982-03-17	0,1	0,1	0	37,04
1982-04-14	0,3	0,4	0,3	37,056
1982-05-17	0,2	0,2	0	37,06
1982-07-05	0,3	0,2	0,1	37,048
1982-08-04	0,3	0	0,1	37,048
1982-09-10	0,2	0,2	0	37,050
1982-10-06	0,2	-0,1	0	37,046
1982-11-02	0,1	0,1	0	37,043
1983-01-11	0,1	0,1	0	37,05
1983-03-01	0,2	0,1	0,1	37,046
1983-04-12	0,1	0,1	0,1	37,064
1983-05-03	-0,1	0	-0,1	37,055
1983-06-09	0,1	0,05	-0,1	37,053
1983-07-14	0	0	-0,1	37,056
1983-08-11	0	-0,1	-0,1	37,05
1983-09-13	0,1	0,1	0	37,054
1983-11-11	0,1	0,1	0	37,07
1984-01-11	0,3	0,2	0,2	37,048
1984-02-14	0,2	0,1	0,1	37,052
1984-03-08	-0,2	0	-0,1	37,048
1984-07-17	0	-0,1	0,1	37,06
1984-09-28	0,075	0,04	0,04	37,065
1984-11-13	0,08	0,075	0,05	37,061
1984-12-12	0,2	0,09	0,1	37,055
1985-01-22	0,2	0,1	0,1	37,054
1985-02-26	0,5	0,05	-0,04	37,059
1985-04-16	0,06	0,04	0,03	37,067

Fuente: elaboración propia, con base en Archivos del Laboratorio de Metrología Rodolfo Koenigsberger.

Apéndice 2. **Instrucciones para solicitud de calibración de patrón de tensión DC en el Centro Nacional de Metrología (CENAME)**

- Realizar solicitud en el Centro Nacional de Metrología, Laboratorio de Magnitudes Eléctricas, el número de contacto es 22472600, también se puede solicitar información en la página web: [www.cename.gt](http://www.cename.gt)
- Enviar correo de solicitud a la dirección [info@cename](mailto:info@cename) para realizar la solicitud de calibración del patrón.
- El patrón de tensión que se envía a calibrar NUNCA DEBE DESCONECTARSE de la alimentación eléctrica, es decir puede conectarse un arreglo en serie de 2 baterías de 12VDC para colocar de respaldo mientras el patrón es trasladado físicamente, esto debido al coeficiente de temperatura, si se desconecta la alimentación, el horno deja de funcionar y la variación de los valores de tensión puede llegar a niveles críticos e incluso irreversibles, también debido a la antigüedad del patrón, la solución química que provoca la diferencia de potencial tiene menos habilidad de restablecer el valor nominal debido al envejecimiento natural de los elementos que componen la reacción química de la celda saturada.
- Llevar el patrón de tensión a las instalaciones del Centro Nacional de Metrología ubicado en Calzada Atanasio Tzul, 27-32 zona 12, previo haber concertado hora y fecha para la calibración.
- Realizar el pago por cada punto de calibración, se debe consultar el tarifario en vigencia a la fecha de la calibración.
- La calibración toma 15 días hábiles o lo que el metrólogo del laboratorio indique, luego de entregado el patrón, es necesario igualmente mantener la alimentación eléctrica en todo momento para garantizar los resultados del certificado de calibración.

Fuente: elaboración propia, con base en Centro Nacional de Metrología. *Instrucciones para solicitud de calibración*. [www.cename.gt](http://www.cename.gt). Consulta: enero de 2021.

## ANEXOS

### Anexo 1. Especificaciones técnicas para multímetro digital Agilent 3458A

Section 1: DC voltage

Accuracy [ppm of reading (ppm of reading for Option 002) + ppm of range]

Range	24 hour	90 day	1 year	2 years
100 mV	2.5 + 3	5.0 (3.5) + 3	9 (5) + 3	14 (10) + 3
1 V	1.5 + 0.3	4.6 (3.1) + 0.3	8 (4) + 0.3	14 (10) + 0.3
10 V	0.5 + 0.05	4.1 (2.6) + 0.05	8 (4) + 0.05	14 (10) + 0.05
100 V	2.5 + 0.3	6.0 (4.5) + 0.3	10 (6) + 0.3	14 (10) + 0.3
1000 V	2.5 + 0.1	6.0 (4.5) + 0.1	10 (6) + 0.1	14 (10) + 0.1

Transfer accuracy/linearity

Range	10 min, $T_{ref} \pm 0.5^\circ\text{C}$ (ppm of reading + ppm of range)	Conditions
100 mV	0.5 + 0.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Following 4 hour warm-up. Full scale to 10% of full scale.</li> <li>- Measurements on the 1000 V range are within 5% of the initial measurement value and following measurement settling.</li> <li>- <math>T_{ref}</math> is the starting ambient temperature.</li> <li>- Measurements are made on a fixed range (&gt; 4 min.) using accepted metrology practices.</li> </ul>
1 V	0.3 + 0.1	
10 V	0.05 + 0.05	
100 V	0.5 + 0.1	
1000 V	1.5 + 0.05	

Section 9: Ratio (automated)

Type of ratio	
DCV/DCV	Ratio = (input)/(reference)
ACV/DCV	Reference: (HI sense to LO) - (LO sense to LO)
ACDCV/DCV	Reference signal range: $\pm 12\text{ V DC}$ (autorange only)
Accuracy	$\pm$ (input error + reference error) Input error = 1 x total error for input signal measurement function (DCV, ACV, ACDCV) Reference error = 1.5 x total error for the range of the reference DC input

Fuente: Manual de usuario de Multímetro Digital Agilent 3458A. *Especificaciones técnicas para mediciones de relación y transferencia.* s/p

## Anexo 2. Especificaciones técnicas para patrón de tensión DC modelo 732C

### Especificaciones

#### Rendimiento

##### Tensiones de salida

Se proporcionan 10 V, 1 V y 0,1 V en terminales separados de conexión con referencia al terminal VCOM.

##### Estabilidad

La estabilidad de las salidas del 732C con una Tcal de  $\pm 1$  °C y el indicador IN CAL encendido se especifica en la tabla de estabilidad estándar inferior.

Estabilidad del estándar			
Tensión de salida	Estabilidad ( $\pm$ $\mu$ V/V)		
	30 días	90 días	1 año
10 V	0,3	0,8	2,0
1 V	0,6	1,2	3,0
0,1 V	1,2	2,9	9,8

Estabilidad seleccionada			
Tensión de salida	Estabilidad ( $\pm$ $\mu$ V/V)		
	30 días	90 días	1 año
10 V	0,3	0,8	1,0
1 V	0,6	1,2	2,5
0,1 V	1,2	2,9	8,0

##### Ruido en los terminales de salida

Se especifica el ruido de salida para observaciones diarias y a corto plazo, con  $k=1$ .

Tensión de salida	$S_1$ ( $\pm$ $\mu$ V/V) <sup>1</sup>	$S_{7d}$ ( $\pm$ $\mu$ V/V) <sup>2</sup>	Ruido ( $\pm$ $\mu$ V/V rms)
10 V	0,07	0,05	0,06
1 V	0,16	0,14	0,15
0,1 V	1,4	1,3	1,0

<sup>1</sup> $S_1$  es la desviación estándar de la regresión (SDEV) de 90 días para un mínimo dos datos diarios de pruebas de estabilidad.

<sup>2</sup> $S_{7d}$  es la SDEV de los datos de prueba de estabilidad con un filtro de promedio variable de 7 días (MAP).

Para obtener el mejor rendimiento, utilice el producto en entornos controlados con buenas prácticas de puesta a tierra del sistema y de apantallamiento. Para campos de interferencias electromagnéticas (EMI) radiados de 0,25 a 1 V/m de 80 a 130 MHz, añada 9  $\mu$ V a la salida de 1 V, y 3,6  $\mu$ V a la salida de 0,1 V. Para EMI conducidas en la red eléctrica de CA de 1 Vrms de 75 a 80 MHz, añada 1  $\mu$ V a la salida de 1 V, y 0,7  $\mu$ V a la salida de 0,1 V. La salida de 10 V normalmente no se ve afectada por los campos de EMI de hasta 1 V/m o por EMI conducidas de hasta 1 Vrms.

##### Corriente e impedancia de salida

Tensión de salida	Límite de corriente de salida	Impedancia de salida
10 V	12 mA <sup>1</sup>	$\leq 1$ m $\Omega$
1 V	1,2 mA <sup>1</sup>	$\leq 1$ m $\Omega$
100 mV	20 pA	$\leq 100$ $\Omega$

<sup>1</sup>Límite la corriente de salida total a  $\leq 0,1$  mA para conseguir el rendimiento de la batería especificado.

Fuente: Fluke Calibration. *Hoja de datos técnicos del estándar de referencia CC 732C y 734C.*

s/p.