

NOMBRE DEL TRABAJO

**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE PINZAS AMPERIMÉTRICAS BASADO EN LA NORMA NTP 500.010**

AUTOR

**JOSÉ LUIS FERRO QUICAÑO**

RECUENTO DE PALABRAS

**39367 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**204413 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**162 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**4.3MB**

FECHA DE ENTREGA

**Apr 11, 2024 8:43 AM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Apr 11, 2024 8:45 AM GMT-5**

### ● 19% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 19% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 12 palabras)



UNIVERSIDAD NACIONAL  
TECNOLÓGICA DE LIMA SUR

**FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA  
PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN EN  
EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTELS**  
(Art. 45° de la ley N° 30220 – Ley)

Autorización de la propiedad intelectual del autor para la publicación de tesis en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur (<https://repositorio.untels.edu.pe>), de conformidad con el Decreto Legislativo N° 822, sobre la Ley de los Derechos de Autor, Ley N° 30035 del Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, Art. 10° del Rgto. Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales en las universidades – RENATI Res. N° 084-2022-SUNEDU/CD, publicado en El Peruano el 16 de agosto de 2022; y la RCO N° 061-2023-UNTELS del 01 marzo 2023.

**TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

- 1). TESIS (  )      2). TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL (  )

**DATOS PERSONALES**

|                      |                                 |
|----------------------|---------------------------------|
| Apellidos y Nombres: | FERRO QUICANO JOSE LUIS         |
| D.N.I.:              | 45347492                        |
| Otro Documento:      | -                               |
| Nacionalidad:        | PERUANO                         |
| Teléfono:            | 939691368                       |
| e-mail:              | jose Luisferroquicano@gmail.com |

**DATOS ACADÉMICOS**

**Pregrado**

|                              |  |
|------------------------------|--|
| Facultad:                    | FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN           |
| Programa Académico:          | TESIS                                      |
| Título Profesional otorgado: | INGENIERO ELECTRÓNICO Y TELECOMUNICACIONES |

**Postgrado**

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| Universidad de Procedencia: |  |
| País:                       |  |
| Grado Académico otorgado:   |  |

**Datos de trabajo de investigación**

|                        |  |
|------------------------|--|
| Título:                | IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE PINZAS AMPERIMÉTRICAS BASADO EN LA NORMA NTP ISO/IEC 17025:2017 PARA MEJORAR EL ALCANCE DE ACREDITACIÓN DE UNA EMPRESA METROLÓGICA, 2021-2022 |
| Fecha de Sustentación: | 14 DE DICIEMBRE DE 2023  |
| Calificación:          | APROBADO POR UNANIMIDAD  |
| Año de Publicación:    | 2024   |



### AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN VERSIÓN ELECTRÓNICA

A través de la presente, autorizo la publicación del texto completo de la tesis, en el Repositorio Institucional de la UNTELS especificando los siguientes términos:

Marcar con una X su elección.

- 1) Usted otorga una licencia especial para publicación de obras en el REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR.

Si autorizo  No autorizo

- 2) Usted autoriza para que la obra sea puesta a disposición del público conservando los derechos de autor y para ello se elige el siguiente tipo de acceso.

| Derechos de autor         |   |                                     |
|---------------------------|---|-------------------------------------|
| TIPO DE ACCESO            | ATRIBUCIONES DE ACCESO  | ELECCIÓN                            |
| ACCESO ABIERTO<br>12.1(*) | <b>info:eu-repo/semantics/openAccess</b><br>(Para documentos en acceso abierto) | <input checked="" type="checkbox"/> |

- 3) Si usted dispone de una **PATENTE** puede elegir el tipo de **ACCESO RESTRINGIDO** como derecho de autor y en el marco de confiabilidad dispuesto por los numerales 5.2 y 6.7 de la directiva N° 004-2016-CONCYTEC DEGC que regula el Repositorio Nacional Digital de CONCYTEC (Se colgará únicamente datos del autor y el resumen del trabajo de investigación).

| Derechos de autor  |   |          |
|--------------------|---|----------|
| TIPO DE ACCESO     | ATRIBUCIONES DE ACCESO  | ELECCIÓN |
| ACCESO RESTRINGIDO | <b>info:eu-repo/semantics/restrictedAccess</b><br>(Para documentos restringidos)  | ( )      |
|                    | <b>info:eu-repo/semantics/embargoedAccess</b><br>(Para documentos con periodos de embargo. Se debe especificar las fechas de embargo) | ( )      |
|                    | <b>info:eu-repo/semantics/closedAccess</b><br>(para documentos confidenciales)  | ( )      |

(\*) <http://renati.sunedu.gob.pe>



UNIVERSIDAD NACIONAL  
TECNOLÓGICA DE LIMA SUR

Rellene la siguiente información si su trabajo de investigación es de acceso restringido:

Atribuciones de acceso restringido:

---

---

Motivos de la elección del acceso restringido:

---

---

---

---

---

FERRO QUICAÑO JOSE LUIS

\_\_\_\_\_

APELLIDOS Y NOMBRES

45347492

\_\_\_\_\_

DNI

\_\_\_\_\_

Firma y huella:



Lima, 02 de SETIEMBRE del 20 24

**UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**



**“IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE  
PINZAS AMPERIMÉTRICAS BASADO EN LA NORMA NTP ISO/IEC  
17025:2017 PARA MEJORAR EL ALCANCE DE ACREDITACIÓN DE  
UNA EMPRESA METROLÓGICA, 2021-2022”**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de

**INGENIERO ELECTRÓNICO Y TELECOMUNICACIONES**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER**

FERRO QUICAÑO, JOSE LUIS  
ORCID: 0009-0006-9633-9667

**ASESOR**

LA ROSA LONGOBARDI, CARLOS JACINTO  
ORCID: 0000-0002-5439-1452

**Villa El Salvador  
2023**



"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

**DECANATO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN**

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO Y TELECOMUNICACIONES**

En Villa El Salvador, siendo las 11:00 horas del día 14 de diciembre del 2023, en la Facultad de Ingeniería y Gestión, los miembros del Jurado Evaluador, integrado por:

**PRESIDENTE:** Dr. SANTIAGO LINDER RUBIÑOS JIMENEZ DNI N° 43324583 C.I.P. N° 112655  
**SECRETARIO:** Mg. PABLO ANDRES VILLEGAS CHUNGA DNI N° 09694556 C.I.P. N° 199274  
**VOCAL :** Mg. EDGARD OPORTO DIAZ DNI N° 09352077 C.I.P. N° 106881

**ASESOR :** Dr. CARLOS JACINTO LA ROSA LONGOBARDI DNI N° 08093718 C.I.P. N° 55254

Designados mediante Resolución de Facultad de Ingeniería y Gestión N° 335-2022-UNTELS-V.ACAD-FIG de fecha 26 de julio del 2023 quienes dan inicio a la Sesión Pública de Sustentación y Evaluación de Tesis.

Acto seguido, el (la) aspirante al : Grado de Bachiller  Título Profesional

Don: JOSE LUIS FERRO QUICAÑO identificado(a) con D.N.I. N° 45347492 procedió a la Sustentación de:

Trabajo de investigación  Tesis  Trabajo de suficiencia  Artículo científico

Titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE PINZAS AMPERIMÉTRICAS BASADO EN LA NORMA NTP ISO/JEC 17025:2017 PARA MEJORAR EL ALCANCE DE ACREDITACIÓN DE UNA EMPRESA METROLÓGICA, 2021-2022"**.

Aprobado mediante Resolución de Facultad de Ingeniería y Gestión N° 112-2023-UNTELS-CO-V.ACAD-FIG de fecha 18 de abril del 2023, de conformidad con las disposiciones del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales vigentes, sustentó y absolvió las interrogantes que le formularon los señores miembros del Jurado Evaluador.

Concluida la Sustentación se procedió a la evaluación y calificación correspondiente, resultando el aspirante **APROBADO** por... **UNANIMIDAD** .....con la nota de: **QUINCE** (letras)..... **15** (números), de acuerdo al Art. 65° del Reglamento General para optar el Título Profesional.

| CALIFICACIÓN |        | CONDICIÓN               | EQUIVALENCIA |
|--------------|--------|-------------------------|--------------|
| NÚMERO       | LETRAS |                         |              |
| 15           | QUINCE | APROBADO POR UNANIMIDAD | BUENO        |

Siendo las 12:00 horas del día 14 de diciembre del 2023, se dio por concluido el acto de sustentación, firmando el jurado evaluador el Acta de Sustentación, que obra en el Decanato de la Facultad de Ingeniería y Gestión.

Mg. PABLO ANDRÉS VILLEGAS CHUNGA  
SECRETARIO  
C.I.P. N° 199274

Dr. SANTIAGO LINDER RUBIÑOS  
PRESIDENTE  
C.I.P. N° 112655

MG. EDGARD OPORTO DIAZ  
VOCAL  
C.I.P. N° 106881

JOSE LUIS FERRO QUICAÑO  
SUSTENTANTE

## **DEDICATORIA**

A la memoria de JEAC, el amigo que me encaminó en el mundo de la ingeniería.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios.

A los docentes de la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur (UNTELS) que me acompañaron en mi periodo de formación universitaria, compartiéndome sus conocimientos y experiencias.

A mi familia y a todas las personas que de manera directa o indirecta me brindaron su apoyo para crecer como persona y como profesional.

Muchas gracias.

## RESUMEN

El objetivo general del presente trabajo de investigación fue determinar en qué medida la implementación de un procedimiento de calibración de pinzas amperimétricas basado en la norma NTP ISO/IEC 17025:2017 mejora el alcance de acreditación de una empresa metrológica (2021-2022).

La investigación es del tipo aplicada, con enfoque de investigación del tipo mixto, esto quiere decir que es una combinación entre una investigación cualitativa y una investigación cuantitativa. El diseño empleado fue no experimental, transversal y con un nivel descriptivo.

Para mejorar el alcance de acreditación de la empresa metrológica que realiza la calibración de pinzas amperimétricas, se cumplieron con los siguientes requisitos: Estimación de la incertidumbre de medición, validación de hoja de cálculo, verificación del procedimiento de calibración y la comparación interlaboratorio.

Se obtuvieron como resultados una capacidad de medición y calibración menor hasta en un 43,9 % menor al CMC inicial, una fiabilidad de resultados del 100 %, confiabilidad de los resultados en condiciones de repetibilidad (CVR) y precisión intralaboratorio (CVWL) menores al 2.0 % y un desempeño del laboratorio satisfactorio con un error normalizado menor a 1.

La conclusión principal fue que la implementación de un procedimiento de calibración de pinzas amperimétricas basado en la norma NTP ISO/IEC 17025:2017 mejoró el alcance de acreditación de una empresa metrológica. En ese sentido, se redujo la CMC en los puntos de calibración de corriente alterna y se adicionó un nuevo alcance en la calibración de corriente continua.

Palabras clave: Pinza amperimétrica, calibración, incertidumbre, verificación de método, capacidad de medición y calibración.

## ABSTRACT

The general objective of the present research work was to determine to what extent the implementation of a calibration procedure for clamps meter based on the NTP ISO/IEC 17025:2017 standard improves the accreditation scope of a metrological company (2021-2022).

The research is of the applied type, with a mixed type research approach, this means that it is a combination between qualitative research and quantitative research. The design used was non-experimental, transversal and with a descriptive level.

In order to improve the scope of accreditation of the metrological company that performs the calibration of clamps meter, the following requirements were met: Measurement uncertainty estimation, spreadsheet validation, calibration procedure verification and interlaboratory comparison.

The results obtained were a measurement and calibration capability up to 43.9% lower than the initial CMC, 100% reliability of results, reliability of results under repeatability (CVR) and intra-laboratory precision (CVWL) conditions of less than 2.0% and satisfactory laboratory performance with a normalized error of less than 1.

The main conclusion was that the implementation of an clamps meter calibration procedure based on NTP ISO/IEC 17025:2017 improved the accreditation scope of a metrological company. In that sense, the CMC was reduced in the ac calibration points and a new scope was added in the dc calibration.

Keywords: Current clamp meter, calibration, uncertainty, method verification, measurement and calibration capability.

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN .....                     | 1  |
| I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....    | 2  |
| 1.1. Motivación .....                  | 2  |
| 1.2. Estado del arte .....             | 3  |
| 1.3. Descripción del problema.....     | 4  |
| 1.4. Formulación del problema .....    | 12 |
| 1.4.1. Problema general .....          | 12 |
| 1.4.2. Problemas específicos.....      | 12 |
| 1.5. Objetivos .....                   | 12 |
| 1.5.1. Objetivo general.....           | 12 |
| 1.5.2. Objetivos específicos .....     | 12 |
| 1.6. Justificación.....                | 13 |
| 1.6.1. Justificación teórica .....     | 13 |
| 1.6.2. Justificación metodología ..... | 13 |
| 1.6.3. Justificación práctica.....     | 14 |
| 1.6.4. Justificación social .....      | 14 |
| 1.6.5. Justificación económica .....   | 14 |
| II. MARCO TEÓRICO .....                | 15 |
| 2.1. Antecedentes .....                | 15 |
| 2.1.1. Antecedentes Nacionales .....   | 15 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.1.2. | Antecedentes Internacionales.....                                | 17 |
| 2.2.   | Bases teóricas .....   | 19 |
| 2.2.1. | Pinza amperimétrica.....   | 19 |
| 2.2.2. | Conceptos de metrología.....                                     | 23 |
| 2.2.3. | Estadística aplicada en metrología.....                          | 31 |
| 2.2.4. | Estimación de la incertidumbre de medición.....                  | 34 |
| III.   | METODOLOGÍA .....  | 37 |
| 3.1.   | Descripción de la metodología.....                               | 37 |
| 3.1.1. | Etapas del desarrollo de la tesis .....                          | 39 |
| 3.2.   | Implementación de la investigación.....                          | 41 |
| 3.2.1. | Procedimiento de calibración.....                                | 41 |
| 3.2.2. | Elaboración y validación de hoja de cálculo.....                 | 63 |
| 3.2.3. | Elaboración de la capacidad de medición y calibración (CMC)..... | 69 |
| 3.2.4. | Verificación del método de calibración .....                     | 70 |
| 3.2.5. | Evaluación del desempeño del laboratorio .....                   | 80 |
| 3.3.   | Resultados .....   | 85 |
| 3.3.1. | Validación de hoja de cálculo .....                              | 85 |
| 3.3.2. | Resultados de la Capacidad de medición y calibración (CMC) ..... | 86 |
| 3.3.3. | Resultados de la evaluación de veracidad.....                    | 93 |
| 3.3.4. | Resultados de la evaluación de la precisión.....                 | 99 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.3.5. Resultados del desempeño del laboratorio..... | 111 |
| IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....                     | 115 |
| 4.1. Validación de hoja de cálculo .....             | 115 |
| 4.2. Capacidad de medición y calibración (CMC).....  | 116 |
| 4.3. Verificación del método.....                    | 118 |
| 4.4. Evaluación del desempeño.....                   | 120 |
| V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....               | 122 |
| 5.1. Conclusiones .....                              | 122 |
| 5.2. Recomendaciones.....                            | 123 |
| VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                 | 124 |
| ANEXOS .....   | 131 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 1</b> Institutos Nacionales de Metrología miembros del SIM. ....                         | 7   |
| <b>Tabla 2</b> CMC del laboratorio válido desde octubre del 2018 hasta abril del 2022. ....       | 10  |
| <b>Tabla 3</b> Equipamiento utilizado para la calibración de pinzas amperimétricas. ....          | 29  |
| <b>Tabla 4</b> Condiciones ambientales para la calibración de pinzas amperimétricas. ....         | 46  |
| <b>Tabla 5</b> Puntos de calibración para pinzas amperimétricas de hasta 1000A. ....              | 49  |
| <b>Tabla 6</b> Balance de componentes. ....   | 62  |
| <b>Tabla 7</b> Estructura de una tabla ANOVA de un factor. ....                                   | 75  |
| <b>Tabla 8</b> Lista de laboratorios participantes. ....  | 81  |
| <b>Tabla 9</b> Valores de medición en la comparación. ....  | 82  |
| <b>Tabla 10</b> Resultados para rango de medición de 3 mA a 20 A en AC. ....                      | 86  |
| <b>Tabla 11</b> Ecuación para rangos de medición de 3 mA a 20 A en AC. ....                       | 86  |
| <b>Tabla 12</b> Resultados para rango de medición de 20 A a 500 A en AC. ....                     | 87  |
| <b>Tabla 13</b> Ecuación para rangos de medición de 20 A a 500 A en AC. ....                      | 87  |
| <b>Tabla 14</b> Resultados para rango de medición de 500 A a 1000 A en AC. ....                   | 88  |
| <b>Tabla 15</b> Ecuación para rangos de medición de 500 A a 1000 A en AC. ....                    | 88  |
| <b>Tabla 16</b> Resultados para rango de medición de 2,1 mA a 100 mA en DC. ....                  | 88  |
| <b>Tabla 17</b> Ecuación para rangos de medición de 2,1 mA a 100 mA en DC. ....                   | 89  |
| <b>Tabla 18</b> Resultados para rango de medición de 1 A a 200 A en DC. ....                      | 89  |
| <b>Tabla 19</b> Ecuación para rangos de medición de 1 A a 200 A en DC. ....                       | 90  |
| <b>Tabla 20</b> Resultados para rango de medición de 200 A a 1000 A en DC. ....                   | 90  |
| <b>Tabla 21</b> Ecuación para rangos de medición de 200 A a 1000 A en DC. ....                    | 90  |
| <b>Tabla 22</b> Resultados de error e incertidumbre para los distintos valores de corriente. .... | 111 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 23</b> Declaración de satisfacción de resultados para el valor de Corriente 37,8 A a 60 Hz.<br>..... | 112 |
| <b>Tabla 24</b> Declaración de satisfacción de resultados para el valor de Corriente 378 A a 60 Hz.           | 113 |
| <b>Tabla 25</b> Declaración de satisfacción de resultados para el valor de Corriente 900 A a 60 Hz.           | 114 |
| <b>Tabla 26</b> Comparación entre los resultados en Excel y Matlab.....                                       | 115 |
| <b>Tabla 27</b> Comparación entre la CMC 1 y la CMC 2 para corriente alterna. ....                            | 116 |
| <b>Tabla 28</b> Resumen de los resultados de la evaluación de la veracidad en DC. ....                        | 118 |
| <b>Tabla 29</b> Resumen de los resultados de la evaluación de la veracidad en AC. ....                        | 118 |
| <b>Tabla 30</b> Resumen de los resultados de la evaluación de la precisión en DC. ....                        | 119 |
| <b>Tabla 31</b> Resumen de los resultados de la evaluación de la precisión en AC. ....                        | 119 |
| <b>Tabla 32</b> Resultados de la evaluación del desempeño. ....   | 120 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |
|--|
| <b>Figura 1</b> CMC en magnitudes eléctricas (AC & DC) declaradas por países firmantes de MRA. . . 5             |
| <b>Figura 2</b> CMC en magnitudes eléctricas (AC & DC) declaradas por países Sudamericanos..... 6                |
| <b>Figura 3</b> Organismo de Evaluación de la Conformidad (OEC) en el Perú..... 8                                |
| <b>Figura 4</b> Cantidad de laboratorios de calibración vigentes según campo y magnitud. .... 9                  |
| <b>Figura 5</b> Laboratorios de calibración acreditados en Perú por A2LA. .... 10                                |
| <b>Figura 6</b> Funcionamiento básico de una pinza del tipo transformador de corriente. .... 20                  |
| <b>Figura 7</b> Vista interna de una pinza del tipo transformador de corriente (CA). .... 20                     |
| <b>Figura 8</b> Efecto Hall..... 21  |
| <b>Figura 9</b> Funcionamiento básico de las pinzas de efecto Hall. .... 22                                      |
| <b>Figura 10</b> Vista interna de una pinza del tipo efecto Hall. .... 22  |
| <b>Figura 11</b> Diferencia entre una pinza tipo transformador de corriente y tipo efecto Hall. .... 23          |
| <b>Figura 12</b> Conceptos fundamentales sobre la calidad de los resultados de medición. .... 27                 |
| <b>Figura 13</b> Calibrador Multifunción TRANSMILLE 3041 A..... 29   |
| <b>Figura 14</b> Estación de trabajo Multifunción TRANSMILLE EA015..... 30                                       |
| <b>Figura 15</b> Termohigrómetro CENTER 342. .... 30   |
| <b>Figura 16</b> Gráfica de una curva normal. .... 32  |
| <b>Figura 17</b> Efecto de la bobina multiplicadora de 50 vueltas..... 42  |
| <b>Figura 18</b> Current output Terminals (Black & Red)..... 51  |
| <b>Figura 19</b> Current output Terminals (Blue & Yellow) ..... 51   |
| <b>Figura 20</b> Conexión usando un calibrador multifunción y una bobina de corriente de 50 vueltas.<br>..... 52 |
| <b>Figura 21</b> Esquema de conexión de una espira para calibración de pinza amperimétrica..... 52               |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 22</b> Datos del IC y configuración del calibrador multifunción.....                        | 65 |
| <b>Figura 23</b> Lecturas del IC. ....  | 65 |
| <b>Figura 24</b> Cálculo del promedio, corrección, e incertidumbre por múltiples efectos y patrón. .. | 65 |
| <b>Figura 25</b> Incertidumbres típicas. ....   | 66 |
| <b>Figura 26</b> Coeficientes de sensibilidad. ....   | 66 |
| <b>Figura 27</b> Contribución a la incertidumbre.....   | 66 |
| <b>Figura 28</b> Grados de libertad. ....   | 67 |
| <b>Figura 29</b> Incertidumbre combinada, $v_{eff}$ , $k$ . Incertidumbre expandida. ....             | 67 |
| <b>Figura 30</b> Presentación de resultados en certificado de calibración. ....                       | 67 |
| <b>Figura 31</b> Software Matlab utilizado para la validación de la hoja de cálculo.....              | 69 |
| <b>Figura 32</b> Formato en Excel para la evaluación del sesgo.....                                   | 73 |
| <b>Figura 33</b> Diseño anidado. ....   | 75 |
| <b>Figura 34</b> Formato en Excel para evaluación de repetibilidad y precisión intralaboratorio.....  | 79 |
| <b>Figura 35</b> Pinza amperimétrica: marca HIOKI, modelo 3280-20, serie 121212249.....               | 82 |
| <b>Figura 36</b> Formato en Excel para evaluación del error normalizado.....                          | 84 |
| <b>Figura 37</b> Resultados para mediciones de corriente alterna en la hoja de cálculo.....           | 85 |
| <b>Figura 38</b> Resultados para mediciones de corriente alterna en el software Matlab.....           | 85 |
| <b>Figura 39</b> Resultados para mediciones de corriente continua en la hoja de cálculo.....          | 85 |
| <b>Figura 40</b> Resultados para mediciones de corriente continua en el software Matlab.....          | 85 |
| <b>Figura 41</b> Elaboración de ecuación de CMC e intervalo de medición. ....                         | 91 |
| <b>Figura 42</b> Nueva capacidad de medición y calibración del laboratorio.....                       | 92 |
| <b>Figura 43</b> Pinza amperimétrica – 2,1 mA DC. ....  | 93 |
| <b>Figura 44</b> Pinza amperimétrica – 21 mA DC. ....   | 93 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 45</b> Pinza amperimétrica – 100 mA DC. ....  | 94  |
| <b>Figura 46</b> Pinza amperimétrica – 20 A DC.....   | 94  |
| <b>Figura 47</b> Pinza amperimétrica – 200 A DC.....  | 95  |
| <b>Figura 48</b> Pinza amperimétrica – 1000 A DC.....   | 95  |
| <b>Figura 49</b> Pinza amperimétrica – 3 mA AC. ....  | 96  |
| <b>Figura 50</b> Pinza amperimétrica – 30 mA AC. ....   | 96  |
| <b>Figura 51</b> Pinza amperimétrica – 300 mA AC. ....  | 97  |
| <b>Figura 52</b> Pinza amperimétrica – 20 A AC.....   | 97  |
| <b>Figura 53</b> Pinza amperimétrica – 500 A AC.....  | 98  |
| <b>Figura 54</b> Pinza amperimétrica – 1000 A AC.....   | 98  |
| <b>Figura 55</b> Pinza amperimétrica – 2,1 mA DC. ....  | 99  |
| <b>Figura 56</b> Pinza amperimétrica – 21 mA DC. ....   | 100 |
| <b>Figura 57</b> Pinza amperimétrica – 100 mA DC. ....  | 101 |
| <b>Figura 58</b> Pinza amperimétrica – 20 A DC.....   | 102 |
| <b>Figura 59</b> Pinza amperimétrica – 200 A DC.....  | 103 |
| <b>Figura 60</b> Pinza amperimétrica – 1000 A DC.....   | 104 |
| <b>Figura 61</b> Pinza amperimétrica – 3 mA AC. ....  | 105 |
| <b>Figura 62</b> Pinza amperimétrica – 30 mA AC. ....   | 106 |
| <b>Figura 63</b> Pinza amperimétrica – 300 mA AC. ....  | 107 |
| <b>Figura 64</b> Pinza amperimétrica – 20 A AC.....   | 108 |
| <b>Figura 65</b> Pinza amperimétrica – 500 A AC.....  | 109 |
| <b>Figura 66</b> Pinza amperimétrica – 1000 A AC.....   | 110 |
| <b>Figura 67</b> Sesgo de los laboratorios para el punto de calibración de 37,8 A a 60 Hz. .... | 112 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 68</b> Sesgo de los laboratorios para el punto de calibración de 378 A a 60 Hz. ....       | 113 |
| <b>Figura 69</b> Sesgo de los laboratorios para el punto de calibración de 900 A a 60 Hz. ....       | 114 |
| <b>Figura 70</b> Reducción de la CMC 1. ....   | 117 |
| <b>Figura 71</b> Nuevo alcance de calibración válido desde abril del 2022 hasta agosto del 2023. ... | 121 |

## INTRODUCCIÓN

En nuestro país, actualmente existen pocos laboratorios acreditados que pueden brindar el servicio para la calibración de pinzas amperimétricas, esto constituye una dificultad para las empresas que desean obtener datos confiables, ya que, de no ser así, se atenta con los procesos que requieran un nivel de exactitud alto, lo cual afecta con el tiempo a la producción y por ende a la rentabilidad de la organización. Por tal motivo, esta tesis tiene como objetivo mejorar el alcance de acreditación de una empresa metrológica implementando un procedimiento de calibración de pinzas amperimétricas basado en la norma NTP ISO/IEC 17025:2017 en el periodo del año 2021-2022, para satisfacer las necesidades de sus clientes.

La investigación es del tipo aplicada, con enfoque de investigación del tipo mixto, esto quiere decir que es una combinación entre una investigación cualitativa y una investigación cuantitativa. El diseño empleado fue no experimental, transversal y con un nivel descriptivo.

En el capítulo 1, se abordan temas relacionadas a la motivación, estado del arte, descripción del problema, los objetivos y justificación del presente trabajo de investigación. En el capítulo 2, se presentan los antecedentes y bases teóricas que ayudaron a realizar la investigación. En el capítulo 3, se hace una descripción al enfoque mixto, tipo de investigación aplicada, método no experimental, transversal con alcance descriptivo, además de la implementación de la investigación como el desarrollo del procedimiento de calibración, elaboración y validación de hoja de cálculo, elaboración de la capacidad de medición y calibración, verificación del método de calibración y la evaluación del desempeño del laboratorio. En el capítulo 4, se analizan los datos obtenidos luego de la implementación de los parámetros indicados en el capítulo anterior.

Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones finales, donde se detalla las referencias empleadas y los anexos donde se encuentra la matriz de consistencia, junto con otra información complementaria que enriquece la investigación.

## **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Motivación**

En abril de 2018 empecé a laborar como coordinador de calibración y calidad en la empresa metrológica ELICROM PERÚ SAC. Especialmente me sentí impresionado por los métodos de calibración en magnitudes eléctricas, debido al uso de patrones de alta exactitud y a la gran variedad de instrumentos de medición que se pueden calibrar con dichos patrones. Al revisar el alcance de acreditación para la calibración de pinzas amperimétricas del laboratorio noté la falta de ciertas funciones de medición, esto me impulsó a investigar el alcance de acreditación de otros laboratorios en territorio nacional y también a nivel internacional, para luego realizar una comparación con el de la empresa, el resultado fue que el laboratorio contaba con un alcance limitado, debido a que el procedimiento de calibración no utilizaba al máximo las características y funciones del equipamiento utilizado.

Esto motivo en mí, un mayor interés en mejorar el procedimiento que se utilizaba, por ello, en enero de 2020, decidí elegir como tema de tesis la implementación de un procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas basado en la norma NTP ISO/IEC 17025:2017, debido a que no solo mejoraría el alcance de acreditación del laboratorio para brindar un mejor servicio a los clientes, sino que compartiría todo el conocimiento adquirido durante la etapa de investigación y formación profesional para que otros laboratorios en proceso de implementación de un procedimiento igual o similar tengan una guía que les permita resolver ciertas dudas.

Tras varios meses de investigación y elaboración de documentos, en mayo de 2021 inicié con el proceso de implementación del procedimiento de calibración de pinzas amperimétricas en el laboratorio, previa aprobación del gerente técnico, debido a que era necesario contar con la participación de personal técnico. En octubre de 2021 el laboratorio fue auditado por el organismo de acreditación American Association for Laboratory Accreditation (A2LA) y en abril del 2022 se obtuvo el nuevo alcance de acreditación.

Esta tesis representa la culminación de un largo camino de aprendizaje, y no hace más que ubicarme en otros caminos más altos de aprendizaje.

## 1.2. Estado del arte

En este apartado se detallan las investigaciones sobre nuevas técnicas para realizar la calibración de pinzas amperimétricas.

Aladdin et al. (2022) estudiaron los principios de funcionamiento de las pinzas amperimétricas y los transductores de pinza que se basan en el sensor de corriente de efecto Hall, los cuales pueden medir corrientes de CA y CC. Dichos sensores de efecto Hall detectan el campo magnético debido al flujo de corriente, en términos de bajo voltaje correspondiente a la alta corriente inducida en la bobina de corriente. Como resultado, comprobaron que el bajo nivel de voltaje detectado permite asegurar que las mediciones en alta corriente sean trazables al SI.

Teniendo en cuenta las investigaciones recolectadas, se concluye que las técnicas de medición de alta corriente se están desarrollando continuamente para incrementar la exactitud y reducir la incertidumbre de medición. Para alcanzar ese objetivo los investigadores emplean técnicas altamente precisas, exactas y trazables con el fin de preservar la calidad de las mediciones. Por último, es necesario resaltar que el método por comparación indirecta (calibrador en conjunto con bobinas de corriente) empleado en este trabajo de investigación es el que se utiliza más comúnmente en mediciones de alta corriente en aplicaciones industriales y calibraciones en laboratorio.

Samplón et. al (2015) formulan un nuevo método para ejecutar la calibración de instrumentos de medición de corriente basados en la ley de Ampere (transformadores de corriente, pinzas amperimétricas, sondas de Rogowsky, etc.). El método asocia la incertidumbre de medición con la variabilidad geométrica de los circuitos donde se va a medir la corriente y no requiere realizar desplazamientos mecánicos del instrumento. Se basa en el hecho de que el efecto magnético relevante de un circuito sobre un instrumento de medición es la componente tangencial de la fuerza magnética a lo largo de la ruta de integración de la ley de Ampere. Este efecto puede ser recreado por la suma de los efectos magnéticos de un conjunto de circuitos predefinidos, cada uno excitado por una corriente específica (y diferente para cada circuito a recrear). El método también ofrece una representación gráfica de la variabilidad de la respuesta

del instrumento cuando se aplican cables rectos indefinidos descentrados. Utilizaron un montaje experimental y simulaciones por métodos de elementos finitos para comprobar los resultados.

Galliana & Capra (2012) desarrollaron en el Instituto Nacional de Investigaciones Metrológicas (INRIM) una técnica de medición para calibrar pinzas amperimétricas en corriente alterna en el rango de medición de 100 a 1500 A a 50 Hz. Esta técnica es compatible con los estándares nacionales de resistencia de CC, voltaje de CC y la relación de corriente de CA. La implementación consiste de un transformador de corriente estándar (TC), un shunt estándar de 50 mΩ y en un voltímetro digital (DVM) de 6 1/2 dígitos que mide el voltaje en el shunt estándar insertado en un conductor, al que también se le aplica pinza amperimétrica, cuya corriente es suministrada por un TC que puede generar corrientes de hasta 1500 A y es controlado por un transformador variable. La pinza amperimétrica se coloca a un cable de cobre y sobre un soporte basculante que simula el modo de funcionamiento real del medidor. Esta técnica de medición es aplicable en laboratorios metrológicos industriales y es una alternativa a las prácticas de medición de laboratorios secundarios acreditados que involucran calibradores digitales y bobinas de corriente. Esta técnica de medición también se probó utilizando un DVM de alta precisión de 8 1/2 dígitos. Las incertidumbres expandidas ( $k = 2$ ) de la técnica van desde  $1,0 \times 10^{-2}$  A a 100 A hasta  $2,0 \times 10^{-3}$  A a 1500 A.

### **1.3. Descripción del problema**

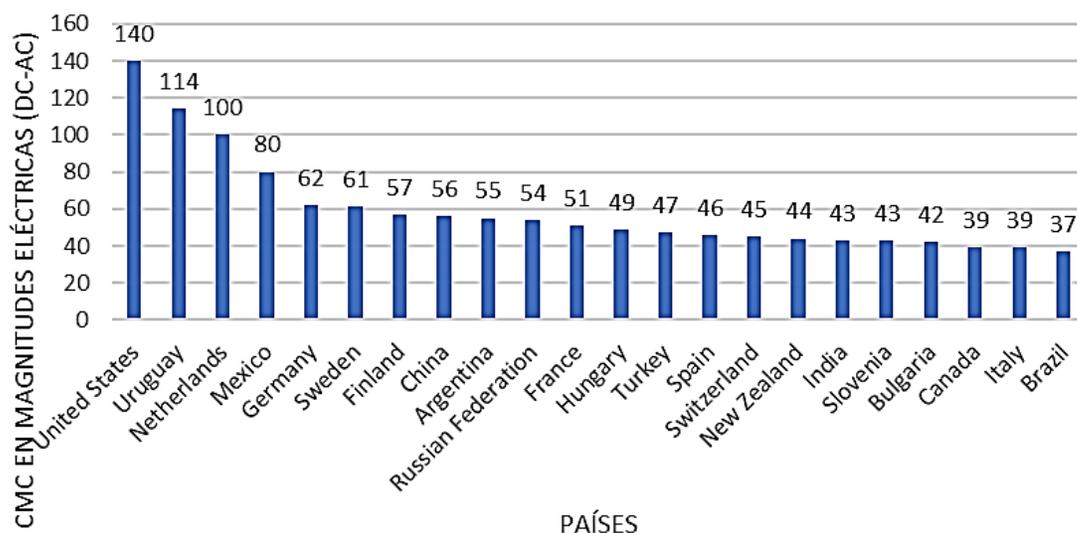
El contar con una acreditación reconoce de manera formal que un Organismo de Evaluación de la Conformidad (OEC) cuenta con la competencia técnica para brindar un servicio. Para obtener la acreditación, es necesario pasar por una auditoría, la cual evalúa el cumplimiento de determinados requisitos según el alcance de acreditación. Es necesario aclarar que un OEC puede ser un laboratorio de ensayo, calibración o clínico. Cuando un laboratorio obtiene una acreditación, se incrementa la credibilidad de sus certificados emitidos, de esa forma los clientes tienen la garantía de recibir resultados confiables y de calidad. La Capacidad de Medición y Calibración (CMC) es la incertidumbre más pequeña que un laboratorio de calibración puede entregar cuando ejecuta calibraciones de manera cotidiana, esta CMC se puede localizar en un documento denominado Alcance de Acreditación (Dirección de Acreditación del Instituto Nacional de la Calidad [INACAL], 2022).

La Cooperación Internacional de Acreditación de Laboratorios (ILAC) es el organismo de cooperación que destaca la colaboración entre laboratorios de calibración, ensayo y organismos de inspección a nivel internacional. El Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MRA) del ILAC es un acuerdo multilateral que establece compromisos entre los países participantes. Este acuerdo garantiza que los OEC, trabajan de manera equivalente, asegurando la confiabilidad de los resultados y eliminando uno de los más grandes obstáculos técnicos del comercio, el cual es la reevaluación de los resultados de los procedimientos de evaluación de conformidad en los países importadores (Sociedad Brasileña de metrología, s.f.)

A nivel internacional existe un total de 100 países que han firmado el Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MRA). Ingresando a la base de datos la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) se puede observar el alcance de acreditación declarado por dichos países, el cual se encuentra clasificado en distintas magnitudes. Para propósito de ese trabajo de investigación se elaboró la figura 1, la cual muestra los primeros 22 países con el mayor número de CMC declaradas para las mediciones eléctricas y magnéticas (ME) en las magnitudes de corriente AC y DC.

**Figura 1**

*CMC en magnitudes eléctricas (AC & DC) declaradas por países firmantes de MRA.*



*Nota.* Elaboración propia en base a la base de datos extraído del CMC por economías. Fuente: BIPM, 2022, <https://www.bipm.org/kcdb/cmc/statistics/public>.

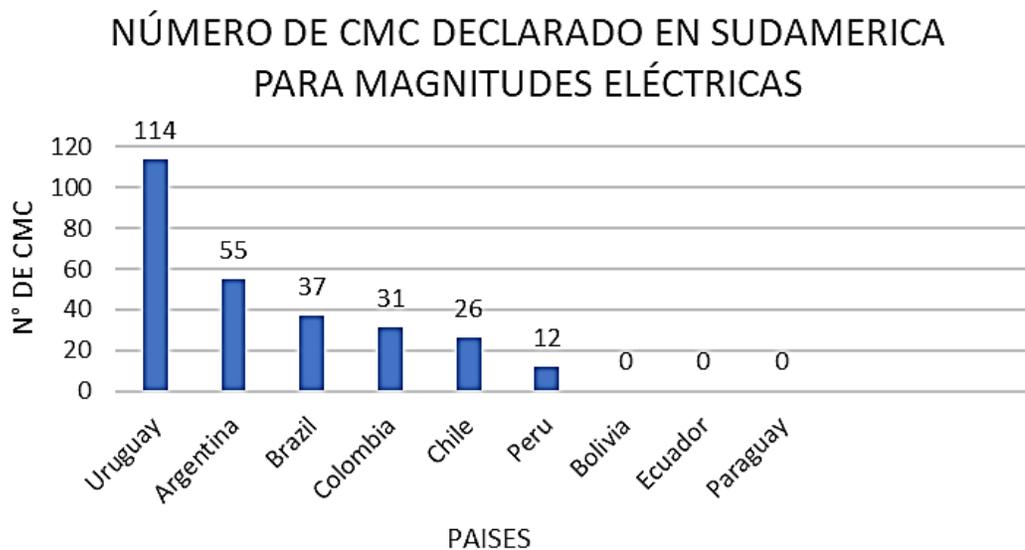
Era de esperarse que los Laboratorios Nacionales de Metrología (LNM) con mayor presencia industrial y mayor capacidad de investigación tales como Estados Unidos, Países Bajos, Alemania, Suecia, Finlandia, China, Rusia, etc. son lo que ocupan los primeros lugares en declarar su CMC en magnitudes eléctricas. Como ejemplo se puede observar que United States tiene un total de 140 CMC declaradas para las mediciones eléctricas y magnéticas (ME) en las magnitudes: DC voltage, current and resistance (64) y AC voltage, current and power (76).

Sin embargo, se puede observar la presencia de países Latinoamericanos tales como Uruguay y Argentina los cuales tienen una gran actividad para declarar CMC en magnitudes eléctricas. Este logro implica que sus laboratorios nacionales de metrología se han dedicado a la investigación científica, actualizado sus procedimientos de calibración tomando como referencia procedimientos publicados por organismos competentes o normas internacionales (BIPM, 2022).

A nivel Sudamérica, Perú se encuentra en el sexto lugar, siendo superado por Uruguay, Argentina, Brasil, Colombia y Chile. Ver figura 2.

**Figura 2**

*CMC en magnitudes eléctricas (AC & DC) declaradas por países Sudamericanos.*



*Nota.* Elaboración propia en base a la base de datos extraído del CMC por economías. Fuente: BIPM, 2022, <https://www.bipm.org/kcdb/cmc/statistics/public>.

Según el BIPM (2023), Perú cuenta con 12 CMC declaradas para las mediciones eléctricas y magnéticas (ME) en las magnitudes de corriente DC (4) y AC (8), las cuales se detallan a continuación: **Tensión, corriente y resistencia de CC (4)**: El cual está conformado por: Corriente CC (hasta 100 A) (1), resistencia CC (2), Tensión CC (hasta 1100 V) (1) y **Voltaje, corriente y potencia AC (8)**. El cual está conformado por: Corriente alterna (1), alimentación de AC (6), Voltaje CA (hasta el rango de MHz) (1).

Es necesario destacar que en Latinoamérica el organismo encargado de organizar el campo de la metrología es el Sistema Interamericano de Metrología (SIM). El SIM apoya a los Institutos Nacionales de Metrología (INM) estimulando el comercio, competitividad, innovación y el desarrollo sostenible. Tiene como objetivos incrementar la capacidad técnica de los INM, apoyar en la implementación de la redefinición del Sistema Internacional de Unidades (SI), y validar que los resultados de medición emitidos cuentan con la trazabilidad metrológica necesaria para demostrar calidad y confianza. La tabla 1 muestra los INM oficialmente designados para la región América del Sur (Sistema Interamericano de Metrología [SIM], 2022)

**Tabla 1**

*Institutos Nacionales de Metrología miembros del SIM.*

| <b>MIEMBRO</b>   | <b>PAÍS</b> | <b>MIEMBRO</b>   | <b>PAÍS</b> |
|--|-------------|--|-------------|
| Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)                 | ARGENTINA   | Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN)   | ECUADOR     |
| Instituto Boliviano de Metrología (IBMETRO)                        | BOLIVIA     | Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (INTN)                                | PARAGUAY    |
| Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) | BRASIL      | Instituto Nacional de Calidad (INACAL)   | PERÚ        |
| Instituto Nacional de Normalización (INM)                          | CHILE       | Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU)   | URUGUAY     |
| Instituto Nacional de Metrología de Colombia (INM)                 | COLOMBIA    | Servicio Autónomo Nacional de Normalización, Calidad, Metrología y Reglamentos Técnicos (SENCAMER) | VENEZUELA   |

*Nota.* Elaboración propia en base a información extraída de: <https://sim-metrologia.org/about-us/members/>

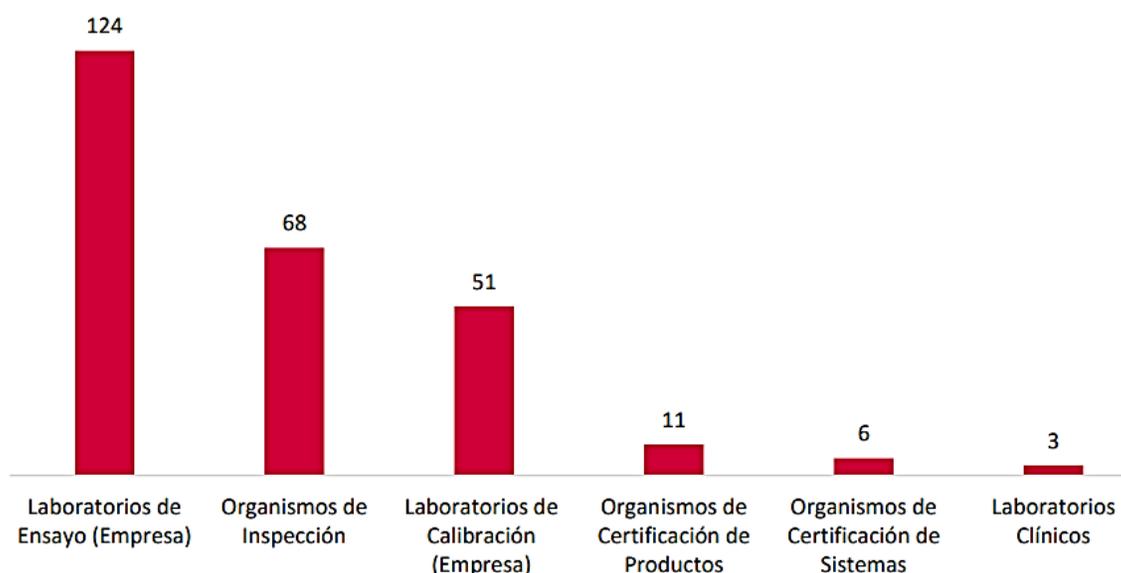
Debido al posicionamiento de nuestro país a nivel Latinoamérica, la Dirección de Metrología del INACAL contribuye de manera continua al desarrollo nacional, debido a que la metrología en los campos científico, legal e industrial respaldan la calidad en diversos sectores, logrando que las industrias nacionales cuenten con mejores estándares internacionales y las más exigentes certificaciones que permitan conseguir productos y servicios que compitan en el mercado nacional e internacional impulsando el crecimiento económico (DA - INACAL, 2022).

En nuestro país existen 51 laboratorios de calibración cuyo alcance de acreditación se encuentra en el Directorio de Organismos de Evaluación de la Conformidad del INACAL. Ver figura 3.

Sin embargo, de esos 51 laboratorios, solo 17 laboratorios de calibración cuentan con acreditación vigente en magnitudes eléctricas (resistencia eléctrica, tensión de corriente, intensidad de corriente. Ver figura 4.

### Figura 3

*Organismo de Evaluación de la Conformidad (OEC) en el Perú.*



*Nota.* Reporte estadístico de 263 OEC con acreditación vigente, al mes de diciembre 2021.

Fuente: DA - INACAL (2022).

**Figura 4**

*Cantidad de laboratorios de calibración vigentes según campo y magnitud.*

| CAMPO                  | MAGNITUD   | N° LABORATORIOS DE CALIBRACIÓN ACREDITADOS |             |
|------------------------|--|--|-------------|
|                        |  | A NOVIEMBRE                                | A DICIEMBRE |
| Mecánica               | Masa   | 34   | 34          |
| Volumen y Densidad     | Volumen  | 10   | 10          |
|                        | Densidad   | 1  | 1           |
| Fluidos                | Presión y vacío  | 7  | 9           |
|                        | Caudal   | 1  | 1           |
| Temperatura y Humedad  | Temperatura  | 14   | 15          |
|                        | Humedad relativa   | 4  | 4           |
| Físico-Química         | Potencial de hidrógeno   | 7  | 7           |
| Dimensional            | Longitud   | 5  | 5           |
| Electricidad           | Resistencia Eléctrica / Tensión de Corriente / Intensidad de corriente | 17   | 17          |
|                        | Conductividad  | 6  | 6           |
| Volumen                | Flujo  | 1  | 1           |
| Físico-Química         | Fracción / concentración de gases                                      | 2  | 2           |
| Tiempo y Frecuencia    | Intervalo de tiempo  | 1  | 1           |
| Radiaciones ionizantes | Radiaciones ionizantes   | 1  | 1           |
| Electricidad           | Carga eléctrica  | 1  | 1           |
| Frecuencia             | Frecuencia   | 2  | 2           |
| Fuerza                 | Fuerza   | 1  | 1           |
| Óptica                 | Opacidad   | 1  | 1           |
| Caudal                 | Caudal de gas  | 2  | 2           |
| Acústica               | Acústica   | 1  | 1           |
| TOTAL (*)              |  | 119  | 122         |

Fuente: DA - INACAL (2022).

De esos 17 laboratorios de calibración en el campo eléctrico a nivel nacional, solo el 12% puede realizar la calibración de pinzas amperimétricas acreditados, a esto hay que agregarle que esos 6 laboratorios se encuentran en el departamento de Lima, evidenciando un déficit de oferta en el mercado peruano, siendo necesario contar con más laboratorios de calibración acreditados para realizar el servicio de calibración de pinzas amperimétricas. Bajo la consigna de cubrir la necesidad del mercado nacional, algunos laboratorios de calibración optan por brindar el servicio de calibración acreditados con organismos internacionales, tales como: American Association for Laboratory Accreditation (A2LA) y El International Accreditation Service (IAS) los cuales son signatarios del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo del ILAC. Sin embargo, a pesar que los resultados emitidos son válidos y confiables, muy pocos deciden esa alternativa. Tal es el caso por ejemplo del organismo A2LA, el cual tiene muchos laboratorios de calibración acreditados en diferentes magnitudes a nivel internacional, pero solo en Perú se cuenta con dos laboratorios acreditados. Ver figura 5.

## Figura 5

Laboratorios de calibración acreditados en Perú por A2LA.

Show  Rows

| Cert. No. | Organization               | Location | Country | Comm. Code | Program                     |
|-----------|----------------------------|----------|---------|------------|-----------------------------|
| 6032.01   | ANALYTICAL LABORATORY EIRL | CALLAO   | Peru    | C1         | ISO/IEC 17025 : Calibration |
| 4286.04   | ELICROM PERÚ SAC           | Lima     | Peru    | C1         | ISO/IEC 17025 : Calibration |

Showing 1 to 2 of 2 entries (filtered from 10 total entries) First Previous **1** Next Last

Fuente: A2LA (2022).

Considerando la demanda de servicios de calibración, no solo de pinzas amperimétricas sino de otras magnitudes en nuestro país, el gerente general de la empresa ELICROM LTDA cuya sede principal se ubica en la ciudad de Guayaquil – Ecuador creó la empresa ELICROM PERÚ SAC, localizada en el departamento de Lima, distrito de Jesús María. La empresa ELICROM PERÚ inició sus operaciones en noviembre de 2018, brindando el servicio de calibración a diferentes empresas cuyos instrumentos de medición se emplean en el rubro industrial, clínico o laboratorio. Su alcance de acreditación bajo la norma ISO/IEC 17025:2017 contaba con la magnitud eléctrica que les permitía realizar la calibración de pinzas amperimétricas únicamente en la función de corriente alterna con un alcance de hasta 1000 A. Ver tabla 2.

**Tabla 2**

CMC del laboratorio válido desde octubre del 2018 hasta abril del 2022.

| Parameter/Range              | Frecuency | CMC ( $\pm$ ) | Comments                          |
|------------------------------|-----------|---------------|-----------------------------------|
| AC Current – Clamp On Meters |           |               |                                   |
| Up to 100 A                  |           | 0.41 A        |                                   |
| (>100 to 300) A              | 56 Hz     | 1.1 A         | Transmille<br>3041A with<br>EA015 |
| (>300 to 500) A              |           | 1.7 A         |                                   |
| (>500 to 700) A              |           | 2.3 A         |                                   |
| (>700 to 1000) A             |           | 3.0 A         |                                   |

*Nota.* Elaboración propia en base a la tabla extraída del alcance de acreditación ELICROM PERÚ. Fuente: A2LA (2018).

Se puede observar en la tabla 2 que el alcance de acreditación en la magnitud eléctrica limita al laboratorio a realizar únicamente la calibración de pinzas amperimétricas en la función de Corriente alterna hasta 1000 A, además no indica de manera adecuada la CMC para valores de corriente en el rango de mA ya que solo se muestra un primer rango hasta 100 A (Up to 100 A), no dejando claro desde que valor inicia el rango de calibración, este problema se debe a que no se implementó un procedimiento adecuado que considere el uso del calibrador en todos sus rangos y funciones de medición, generando una restricción para calibrar las pinzas amperimétricas. El efecto de esta limitación se vio reflejado en las observaciones que los clientes realizaron respecto a los puntos de calibración ofertados en la tabla 2, ya que muchos de ellos necesitaban que sus pinzas amperimétricas también sean calibradas en la función de corriente continua en mA y A.

Para brindar una solución provisional, solo en caso de que los clientes solicitaban puntos de calibración fuera del alcance de acreditación, se les informaba que, si era posible la calibración, porque se demostraba trazabilidad metrológica por medio del certificado de calibración del patrón, no obstante, se colocaba una nota en el certificado de calibración emitido al cliente, indicando que los puntos de calibración adicionales (Corriente Continua hasta 1000 A) se encontraban fuera del alcance de acreditación.

Debido a este problema, decidí implementar un procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas basado en la norma NTP ISO/IEC 17025, para mejorar el alcance de acreditación del laboratorio. Las principales actividades realizadas fueron: Mejorar la capacidad de medición y calibración mediante la estimación de incertidumbre de medición, obteniendo una CMC para corriente alterna en el rango de 3 mA hasta 1000 A y para corriente continua en el rango de 2.1 mA hasta 1000 A; realizar la validación de la hoja de cálculo utilizada para realizar los cálculos matemáticos y estimación de incertidumbre, asegurando de esa forma la fiabilidad de los resultados emitidos en el certificado de calibración; ejecutar la verificación del procedimiento de calibración, para asegurar que el laboratorio puede llevar a cabo de manera apropiada los métodos antes de utilizarlos y evaluar el desempeño del laboratorio frente a otros laboratorios, validando las estimaciones de incertidumbre declaradas, proporcionando confiabilidad a los clientes en la emisión de los resultados.

## **1.4. Formulación del problema**

### ***1.4.1. Problema general***

¿En qué medida la implementación de un procedimiento de calibración de pinzas amperimétricas basado en la norma NTP ISO/IEC 17025:2017 podrá mejorar el alcance de acreditación de una empresa metrológica (2021-2022)?

### ***1.4.2. Problemas específicos***

- ¿Cómo mejorar la capacidad de medición y calibración mediante la estimación de incertidumbre de medición?
- ¿Cómo garantizar la fiabilidad de los resultados emitidos mediante la validación de la hoja de cálculo?
- ¿Cómo asegurar la confiabilidad de los resultados mediante la verificación del procedimiento de calibración?
- ¿Cómo evaluar el desempeño del laboratorio mediante la participación en comparaciones interlaboratorios?

## **1.5. Objetivos**

### ***1.5.1. Objetivo general***

- Determinar en qué medida la implementación de un procedimiento de calibración de pinzas amperimétricas basado en la norma NTP ISO/IEC 17025:2017 mejora el alcance de acreditación de una empresa metrológica (2021-2022).

### ***1.5.2. Objetivos específicos***

- Estimar la incertidumbre de medición para mejorar la capacidad de medición y calibración (CMC).
- Validar la hoja de cálculo para garantizar la fiabilidad de los resultados emitidos.
- Asegurar la confiabilidad de los resultados mediante la verificación del procedimiento de calibración.
- Evaluar el desempeño del laboratorio a través de la comparación interlaboratorio.

## **1.6. Justificación**

### ***1.6.1. Justificación teórica***

Para Méndez (2011) una investigación tiene justificación teórica si el propósito del investigador es ahondar en uno o varios enfoques teóricos que abordan un problema expuesto, con la expectativa de ampliar el conocimiento propuesto o encontrar nuevas explicaciones que puedan modificar o complementar el conocimiento inicial.

En ese sentido, el presente trabajo de investigación aporta aspectos teóricos que permiten aclarar los conceptos de calibración, verificación del método y estimación de la incertidumbre de medición. Se reafirma el valor de las herramientas estadísticas de análisis de datos para obtener resultados confiables y se proporciona conocimiento técnico para que otras empresas que brindan servicios de calibración puedan realizar la verificación de sus métodos, ya que la sistemática utilizada en este trabajo de investigación puede aplicarse a distintos procedimientos.

### ***1.6.2. Justificación metodología***

Para Bernal (2010) la justificación metodológica de un trabajo de investigación surge cuando se propone un nuevo método o una nueva estrategia de generación de conocimiento válida y confiable.

Por ello, la presente investigación aporta una estrategia metodológica confiable para realizar la verificación de un procedimiento de calibración en una empresa metrológica debido a que las herramientas utilizadas se fundamentan en documentos validados. Además, debido a la versatilidad de la sistemática de verificación implementada, esta puede aplicarse a diversos procedimientos de calibración, de esa forma otros laboratorios de calibración podrán emplearlo o adaptarlo a sus necesidades, considerando algunas variaciones como, por ejemplo, el número de técnicos que participarán en el estudio de veracidad y precisión.

### ***1.6.3. Justificación práctica***

Bernal (2010) afirma que una investigación tiene justificación práctica cuando su desarrollo ayuda en la resolución de un problema o, al menos, sugiere estrategias cuya aplicación podría contribuir a su solución.

Por tal motivo, esta investigación brinda herramientas necesarias para solucionar el problema presentado en el laboratorio ELICROM PERÚ respecto a cómo realizar la implementación y verificación de un procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas. Los resultados obtenidos y la posterior evaluación del desempeño del método evidencian que las herramientas estadísticas utilizadas pueden aplicarse de manera confiable, asegurando la calidad de los resultados.

### ***1.6.4. Justificación social***

Según Ñaupas (2014) una investigación posee justificación social si resuelve problemas que afectan a un grupo social.

Por lo tanto, la investigación tuvo relevancia social, debido a que servirá como fuente de información a investigadores que deseen implementar esa metodología en sus laboratorios de calibración. También impacta a las empresas que buscan el servicio de calibración, mejorando la seguridad y calidad de sus procesos industriales que requieren mediciones precisas, lo que a su vez puede tener un impacto positivo en la salud y bienestar de las personas que utilizan productos o servicios que dependen de mediciones confiables, como, por ejemplo, en el sector médico, automotriz, entre otros.

### ***1.6.5. Justificación económica***

Baena (2017) menciona que la justificación económica implica si con la investigación es posible recuperar el dinero invertido durante el proceso, generando ganancia para la empresa.

Desde el punto de vista económico, la investigación ayudó a mejorar el alcance de acreditación de la empresa metrológica incrementando la venta de servicios de calibración; esto significó un incremento de los ingresos, obteniendo utilidad sobre la inversión realizada.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. *Antecedentes Nacionales*

Tarrillo (2019) realizó un estudio sobre la elaboración de un procedimiento operativo estándar de calibración de material volumétrico de vidrio para el Centro de Control de Calidad de Medicamentos de la Universidad Nacional de Trujillo. Su objetivo principal fue definir una metodología para asegurar un procedimiento sistemático, estandarizado y conciso. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo del tipo aplicada y transversal, debido a que recopiló datos y uso de herramientas matemáticas para medir los resultados, abordó el problema de no contar con un procedimiento de calibración y realizó el estudio durante un período de tiempo concreto. Como resultado de su investigación elaboró un procedimiento que fue elaborado en concordancia con procedimientos de órganos nacionales e internacionales. La autora llegó a la conclusión de que el procedimiento se elaboró tomando como referencia los lineamientos del procedimiento para la calibración de material volumétrico de vidrio del Instituto Nacional de Calidad (INACAL); en el cual se describe de forma detallada los pasos a seguir en la calibración de fiolas, pipetas, buretas y probetas. Como comentario se resalta que la autora elaboró el procedimiento tomando como referencia principal los lineamientos del procedimiento para la calibración de material volumétrico de vidrio del Instituto Nacional de Calidad (INACAL); en la cual se describe los pasos a seguir para ejecutar la calibración de probetas, fiolas, buretas y pipetas, cuyo campo de aplicación va de 0,5 ml hasta 5000 ml.

Merello (2021) realizó un estudio sobre diseño, implementación y calibración de un módulo de medición de conductividad térmica de líquidos por el método transitorio del hilo caliente. Su objetivo principal fue implementar un módulo para la medición de conductividad térmica de fluidos, evaluando y analizando las propiedades térmicas de cada fluido muestra y generando su caracterización. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo del tipo aplicada y transversal, debido a que realizó una serie de mediciones con fluidos de muestra, aplicando distintos parámetros de medición como la longitud del hilo caliente, las dimensiones de la celda de medición, el tiempo de medición y tiempo de reposo entre otros para luego ser procesados mediante un software. Como resultado de su investigación logró diseñar, implementar y calibrar

un módulo de medición de conductividad térmica según el método transitorio del hilo en el laboratorio de investigación de ciencia de los materiales de la Universidad Católica de Santa María. El autor llegó a la conclusión de que es conveniente realizar un número apropiado de mediciones, con lo cual logró incrementar la confiabilidad del instrumento. Como comentario se resalta que el autor logró obtener resultados que demuestran una gran conformidad, obteniendo incertidumbres estimadas de hasta 0.15% y 0.25% para las muestras de etilenglicol y agua destilada respectivamente.

Ludeña (2019) realizó un estudio sobre el diseño e implementación de un túnel de viento de circuito abierto para lograr una mejor exactitud en la calibración de anemómetros. Su objetivo principal fue diseñar e implementar un túnel de viento de circuito abierto aplicando criterios para su diseño y funcionamiento. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo del tipo aplicada y transversal, debido a que caracterizó el túnel de viento en los puntos de 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s, 25 m/s, 30 m/s para luego realizar métodos estadísticos de análisis. Como resultado de su investigación logró diseñar e implementar el túnel de viento, obteniendo durante la caracterización del túnel una estabilidad menor a  $\pm 0.21$  m/s y una turbulencia por debajo del 2 %, cumpliendo con el estándar de la IEC 61400-12-1 para la calibración de anemómetros. El autor llegó a la conclusión de que las dimensiones del túnel de viento se definen de acuerdo a la infraestructura del laboratorio, fundamentado por los aspectos teóricos, además, el desempeño metrológico del túnel de viento de circuito abierto se encontró dentro de los márgenes permisibles según los estándares de la IEC 61400-12-1 permitiendo su uso para la calibración de anemómetros. Como comentario se resalta que el autor utilizó patrones calibrados por organismos acreditados (DM-INACAL y ACCREDIA) para demostrar trazabilidad metrológica.

### **2.1.2. Antecedentes Internacionales**

Vicente (2017) realizó un estudio sobre la ampliación y mejora de la capacidad de medida y calibración de higrómetros de punto de rocío con el patrón nacional de humedad en el margen de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El objetivo principal fue la ampliación y mejora de la capacidad de medida y calibración de higrómetros de punto de rocío con el patrón nacional de humedad en el margen de temperatura de punto de rocío de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La investigación tiene un enfoque cuantitativo del tipo aplicada, descriptiva y transversal. Como resultado de su investigación logro ampliar y mejorar la capacidad de medida y calibración. La incertidumbre típica de medida de la temperatura de punto de rocío (para  $k=2$ ) en el margen de interés de esa Tesis, ha pasado de ser de entre  $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  de  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ , as ser de  $0,050\text{ }^{\circ}\text{C}$  en todo el margen, ampliado hasta  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El autor llegó a la conclusión de que al ampliar y mejorar la CMC para realizar la calibración de higrómetros de punto de rocío sitúa a España en la lista de países con la mejor CMC en la magnitud de temperatura de punto de rocío. Como comentario se resalta la participación en comparaciones internacionales de temperatura de punto de rocío como CCT-K8 para determinar la calidad de los resultados obtenidos.

Solórzano (2018) realizó un estudio sobre el diseño de sistema de calibración de manómetros de presión diferencial para la industria farmacéutica. El objetivo principal fue diseñar un sistema de calibración de manómetros de presión diferencial de bajo costo para las áreas de producción de la industria farmacéutica, que utilice el proceso de calibración por comparación con manómetro patrón, capaz de generar reportes de calibración que permitan un registro histórico para su trazabilidad. La investigación tiene un enfoque cuantitativo del tipo aplicada, descriptiva y transversal. Como resultado de su investigación logró diseñar un sistema de calibración de manómetros adecuado para realizar la calibración de instrumentos de medición de presión diferencial en la industria farmacéutica, brindando trazabilidad metrológica a las mediciones a través del siguiente equipamiento: una bomba calibradora de baja presión cuyo rango es de  $\pm 40\text{ kPa}$  con una resolución de  $0,001\text{ Pa}$  y el manómetro digital Dwyer 475-000 cuyo rango de medición es de  $-250$  a  $250\text{ Pa}$  con un error de  $0,5\text{ \% FS}$ . El autor llegó a la conclusión de que las pruebas de validación realizadas, asegura que el sistema de calibración propuesto se puede utilizar en la industria farmacéutica.

Como comentario se resalta que el autor considero la reglamentación y legislación de la industria farmacéutica guatemalteca, con el objetivo de verificar que el procedimiento de calibración que estaba llevando a cabo fuera válido.

Gusqui (2021) realizó un estudio sobre la implementación de un banco para calibración de cronómetros utilizando un oscilador de rubidio para el laboratorio de metrología de la facultad de mecánica. El objetivo principal fue implementar un banco de pruebas para realizar calibración de instrumentos de tiempo, así como elaboración de los procedimientos para realizar la misma de forma adecuada, mediante la aplicación de patrones vigentes en el país. La investigación tiene un enfoque cuantitativo del tipo aplicada, descriptiva y transversal. Como resultado de su investigación logró implementar un banco de calibración para instrumentos de tiempo, específicamente cronómetros basados en un oscilador de rubidio BELL EFRATON, donado por el Centro de Metrología del Ejército Nacional Ecuatoriano, para la Facultad de Mecánica. El autor llegó a la conclusión de que el error relativo mostró el mayor valor en la primera medición, con un valor de  $3,33 \times 10^{-5}$  mientras que en contraste el valor inferior es hallado en la quinta lectura, con un valor de  $1,83 \times 10^{-6}$ . El error porcentual que es el que da el criterio de aceptación o rechazo mostró el mayor valor en la primera lectura, concretamente de 0.33% mientras que el valor mínimo es hallado en la última lectura, correspondiéndole un valor de 0.0139%; en ninguna de las lecturas el valor porcentual supera el 10%, valor al cual es rechazo total de un proceso y más cuando se trata de calibración, por ello da por aceptado en su totalidad el proceso de calibración. Como comentario se resalta la verificación que realizó el autor al patrón utilizado, cumpliendo con los requisitos exigidos por la ISO/IEC 17025 respecto a la trazabilidad de las mediciones.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Pinza amperimétrica**

Es un instrumento que permite medir la corriente eléctrica alterna o continua. Existen muchas diferencias entre los diversos modelos que existen en el mercado, pero la principal es la exactitud de medición, debido básicamente al diseño y al método de medición utilizado. Por su construcción existen 2 tipos de pinzas, las de efecto Hall y las de tipo transformador de corriente. Las de efecto Hall puede medir corrientes continuas y alternas hasta una frecuencia máxima que varía según el tipo de construcción, por lo general no superan frecuencias de 1 kHz o 10 kHz como máximo y las de tipo transformador de corriente miden únicamente corrientes alternas (normalmente de 60 Hz). (INACAL, 2019, p.9).

#### **Pinzas del tipo transformador de corriente**

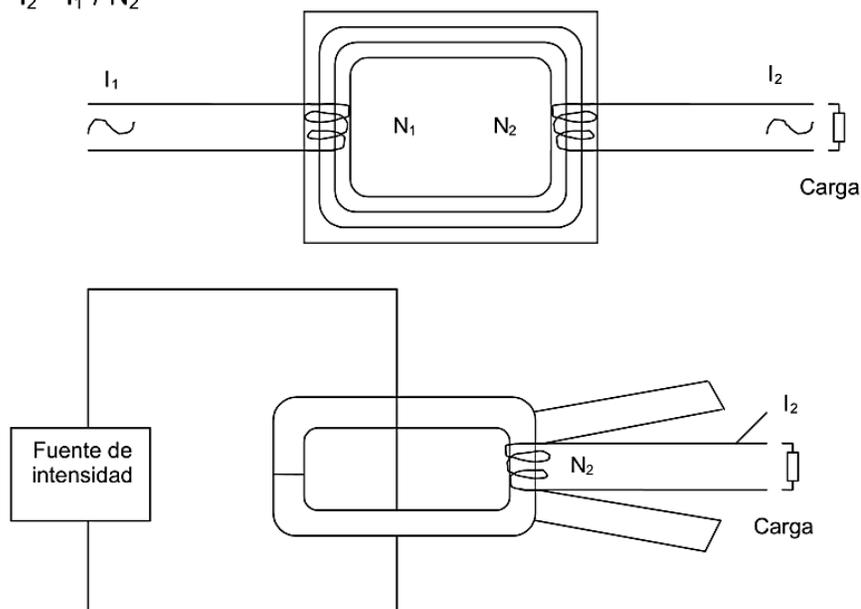
Un transformador de corriente está conformado por dos arrollamientos bobinados sobre un núcleo magnético común. Cuando una corriente ( $I_1$ ) atraviesa el bobinado primario, genera un campo magnético alterno de la misma frecuencia. Las líneas del campo magnético que se canalizan por el circuito magnético atraviesan el arrollamiento secundario de forma que cada una de sus espiras se somete a un flujo periódico variable de la misma frecuencia. Si el arrollamiento secundario se carga por ejemplo mediante una resistencia, una corriente ( $I_2$ ) recorrerá ese arrollamiento. Si el número de vueltas del arrollamiento primario y secundario son respectivamente  $N_1$  y  $N_2$ , aplicando las leyes del electromagnetismo se cumple la siguiente relación:  $N_1 \times I_1 = N_2 \times I_2$  (INACAL, 2019, pp. 9-10).

La figura 6 muestra que para medir la corriente  $I_2$  se deberá emplear un instrumento apropiado. La primera opción es utilizar una pinza de lectura directa, el cual cuante con esta función de medición y en el caso de realizar una lectura indirecta se puede usar por lo general un multímetro digital. Diversas pinzas de lectura indirecta cuentan con una resistencia o un puente rectificador a la salida del arrollamiento secundario, de manera que la salida es una tensión continua o alterna proporcional a  $I_1$ , en lugar de una corriente (INACAL, 2019, p. 11). La figura 7 muestra una pinza amperimétrica del tipo transformador de corriente (solo en AC) donde sus mordazas están envueltas de manera individual con bobinas de alambre de cobre.

## Figura 6

*Funcionamiento básico de una pinza del tipo transformador de corriente.*

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$
$$N_1 = 1$$
$$I_2 = I_1 / N_2$$



*Nota.* El conductor rodeado por la pinza se comporta como el arrollamiento primario, de una sola espira. Fuente: CEM (2008).

## Figura 7

*Vista interna de una pinza del tipo transformador de corriente (CA).*



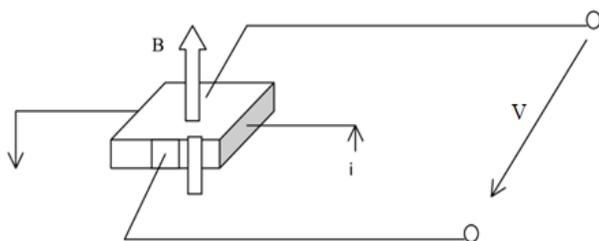
Fuente: FLUKE (s.f.)

## Pinzas de efecto Hall

El efecto Hall ocurre cuando una corriente ( $i$ ) traspasa una célula semiconductor de efecto Hall y al mismo tiempo se aplica un campo magnético de inducción ( $B$ ) perpendicular al sentido del paso de la corriente, produciendo en las caras laterales de la célula una tensión ( $V$ ) proporcional al valor de la inducción y de la corriente. Esta diferencia de potencial eléctrico se conoce como tensión de efecto Hall. Para el caso de las pinzas amperimétricas, la corriente ( $i$ ) es creada por un circuito electrónico energizado por la batería, mientras que el campo magnético ( $B$ ) es creado por la corriente ( $I$ ) el cual fluye por el conductor rodeado por las tenazas de la pinza. La figura 8 muestra el funcionamiento de las pinzas de efecto Hall. La gran ventaja del efecto Hall es que se puede medir tanto corrientes continuas, como alternas, ya que la tensión de salida de la célula Hall será continua o alterna, según sea la corriente ( $I$ ) (INACAL, 2019, p. 11).

### Figura 8

*Efecto Hall.*

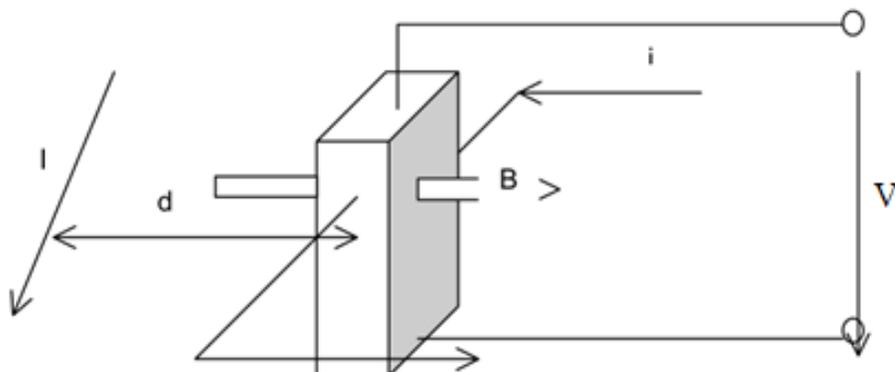


*Nota.*  $B$  (Campo magnético de inducción),  $i$  (Corriente creada con un circuito electrónico),  $V$  (Tensión de efecto Hall). Fuente: CEM (2008).

Conociendo la distancia ( $d$ ) entre el centro del conductor por donde fluye la corriente ( $I$ ) y la célula Hall, se tiene la siguiente ecuación:  $B = \mu I / 2 d$ , donde  $\mu$  es la permeabilidad magnética del aire. Para reducir los errores de medición debido a un incorrecto centrado del conductor en la pinza, se utiliza un circuito magnético de alta permeabilidad colocado en el interior de las mordazas de la pinza, el cual canaliza favorablemente el campo magnético creado por el conductor para aplicarlo con la dirección conveniente a la célula de efecto Hall. En la figura 9 se presenta el funcionamiento básico de las pinzas de efecto Hall (INACAL, 2019, p. 12)

### Figura 9

*Funcionamiento básico de las pinzas de efecto Hall.*



Fuente: CEM (2008).

Las pinzas amperimétricas de efecto Hall cuentan con mordazas de hierro rígido para concentrar el campo magnético que rodea al conductor por donde fluye la corriente ( $I$ ). En contraste con las pinzas de transformador de corriente, sus mordazas no están envueltas con alambres de cobre. En su lugar, el campo magnético generado por la corriente que fluye por el conductor se centra en uno o más espacios en el núcleo luego de que la mordaza está acoplada alrededor del conductor (FLUKE, s.f.)

La figura 10 muestra el interior de una pinza amperimétrica de efecto Hall (DC y AC) donde se logra visualizar el sensor de efecto Hall que se encuentra en el espacio de aire entre las mordazas de la pinza.

### Figura 10

*Vista interna de una pinza del tipo efecto Hall.*

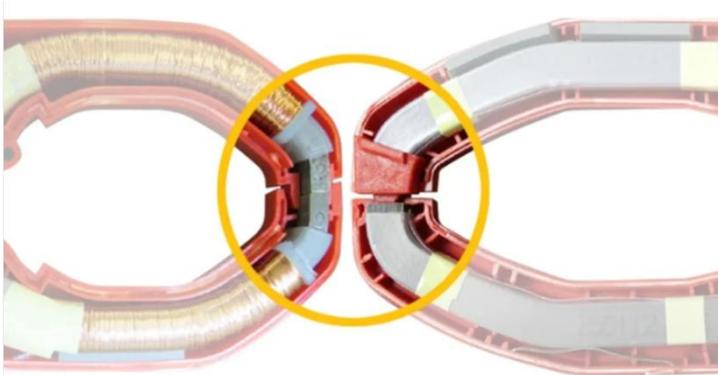


Fuente: Díaz (2018).

Una forma para diferenciar de manera práctica si una pinza es del tipo transformador de corriente o del tipo efecto Hall es revisando sus mordazas. La figura 11 muestra al lado derecho la pinza amperimétrica de efecto Hall, y se puede identificar de manera sencilla debido a que existe un espacio entre las puntas de las mandíbulas, creando una bolsa de aire que el campo magnético debe saltar. Por otra parte, al lado izquierdo se puede observar las mordazas de una pinza de transformador de corriente de solo AC, las cuales están al ras cuando están cerradas y al abrir las puntas se puede visualizar las caras de núcleo de metal desnudo (FLUKE, s.f.)

### **Figura 11**

*Diferencia entre una pinza tipo transformador de corriente y tipo efecto Hall.*



Fuente: FLUKE (s.f.).

### **2.2.2. Conceptos de metrología**

#### **Metrología**

La metrología es la ciencia de las mediciones y abarca tanto aspectos experimentales como teóricos acerca de las mediciones realizadas en múltiples campos de la ciencia, industria y tecnología, asociadas con una incertidumbre.

#### **Calibración**

La calibración es un proceso de comparación entre la lectura de un instrumento de medición contra otro equipo patrón calibrado de mayor exactitud y trazable al Sistema Internacional de Unidades, como resultado de una calibración se obtiene un error de medición asociado a una incertidumbre.

### **Error de medida**

Es la diferencia algebraica entre el valor de lectura de un instrumento de medición y un valor de referencia. Para el caso de esta tesis, el error de medición de la pinza amperimétrica a calibrar se determina como la diferencia entre la lectura de la pinza y el valor generado por el calibrador multifunción en conjunto con la bobina multiplicadora de corriente.

### **Corrección**

La corrección es el opuesto del error de medida, por lo general en los certificados de calibración se reporta el error de medición, sin embargo, otra práctica es la de reportar la corrección para que el usuario pueda obtener las lecturas corregidas de las mediciones realizadas con el instrumento calibrado.

### **Exactitud de medida**

La exactitud de medida indica que tan próximo se encuentra un valor medido respecto a un valor de referencia.

### **Precisión de medida**

La precisión de medida mide que tan próximos se encuentran las mediciones realizadas entre sí. Por lo general, la forma de medición se realiza a través de la desviación estándar.

### **Repetibilidad**

La repetibilidad es una medida de variabilidad en los resultados de las mediciones obtenidas por una sola persona (técnico metrólogo, analista, operario, etc.) en un laboratorio, bajo condiciones poco variables tales como utilizar un mismo instrumento de medición, trabajar en un corto intervalo de tiempo, etc.

### **Precisión intermedia**

La precisión intermedia permite estimar la variación de los resultados obtenidos en un laboratorio bajo condiciones más variables que en la repetibilidad, estas condiciones pueden ser diferentes técnicos, períodos de tiempo de medición extensos, diferentes instrumentos de medición, etc.

## **Reproducibilidad**

La reproducibilidad al igual que la repetibilidad mide la variabilidad en los resultados obtenidos, pero la diferencia radica que, en lugar de ser obtenidas por una sola persona en un laboratorio, los resultados se obtienen de diferentes laboratorios.

## **Incertidumbre de medida**

Es un parámetro que representa la dispersión de un resultado de medición, esta dispersión se origina porque las mediciones no son perfectas y siempre existe una duda al momento de obtener un resultado de medición. La incertidumbre permite conocer que tan confiable es un resultado de medición, si la incertidumbre es muy alta entonces la medición no es precisa, pero si la incertidumbre de medición es baja, entonces la medición es más precisa.

## **Capacidad de Medición y Calibración**

La capacidad de medición y calibración, conocida por sus siglas CMC, es la incertidumbre de medición más pequeña que un laboratorio puede ofrecer. Para obtener la CMC en un laboratorio de calibración, es muy común trabajar con equipos ideales, al no presentar variabilidad, los aportes de incertidumbre por repetibilidad son nulos, quedando solo los aportes de incertidumbre tipo B. Es importante resaltar que cuando un laboratorio emite un certificado de calibración, la incertidumbre expandida que reporta solo puede ser mayor o igual al CMC.

## **Acreditación**

La acreditación es evidencia de que una organización puede ejecutar actividades de inspección, ensayo, calibración entre otras, de manera competente y de calidad. En nuestro país el organismo encargado de brindar la acreditación a un OEC es el INACAL.

## **Comparación interlaboratorio**

Una comparación interlaboratorio es una actividad en la que pueden participar 2 o más laboratorios, con la finalidad de conocer su desempeño de manera objetiva. En el caso de los laboratorios de calibración, por lo general, el método por el cual determinan un buen desempeño es a través del análisis del error normalizado, cuyo valor debe ser menor 1 para declarar como satisfactorio un resultado obtenido.

## **Validación**

La validación consiste en comprobar a través de evidencias objetivas, de que un método o procedimiento en específico se está realizando de manera correcta y lo más importante es que dicho método o procedimiento puede ser utilizado para un uso específico. La validación de un método o procedimiento se realiza cuando: El laboratorio modifica procedimientos que ya fueron validados, emplean procedimientos desarrollados por ellos mismos o trabajan fuera del alcance especificado por el fabricante para el uso previsto de algún equipamiento.

## **Verificación**

La verificación consiste en comprobar a través de evidencias objetivas, la correcta aplicación de un método o procedimiento ejecutado por algún laboratorio, por lo regular, muchos laboratorios de calibración emplean procedimientos de referencia procedentes de institutos nacionales de metrología y lo que tienen en consideración cuando realizan la verificación son las condiciones propias de trabajo en las que ejecutan el método o procedimiento, estas condiciones pueden ser: el equipamiento utilizado, las condiciones ambientales, el personal, etc. La verificación de un procedimiento se podría llevar a cabo por ejemplo cuando se presenta un cambio mayor en algún procedimiento que ya fue verificado anteriormente o cuando se realiza un mantenimiento preventivo, reparación, traslado o cambio de equipamiento mayor.

## **Diferencia entre Validación y Verificación**

Al analizar las definiciones de validación y verificación se puede determinar que son absolutamente distintos. En la validación se comprueba que se han cumplido los requisitos de un procedimiento o método para un uso específico previsto. La validación sólo se ejecutará en los casos que el laboratorio realice alguna modificación al procedimiento que ya fue validado, por ejemplo, cuando el alcance del laboratorio está fuera del alcance del uso previsto por el fabricante y cuando se utilicen procedimientos desarrollados por ellos mismos. En la verificación el laboratorio únicamente comprueba que puede aplicar correctamente un procedimiento o método ya validado por otro organismo, antes de su uso y sobre todo bajo las condiciones particulares de trabajo. También se puede realizar una verificación cuando ocurra un cambio mayor en algún método que ya hubiera sido verificado anteriormente.

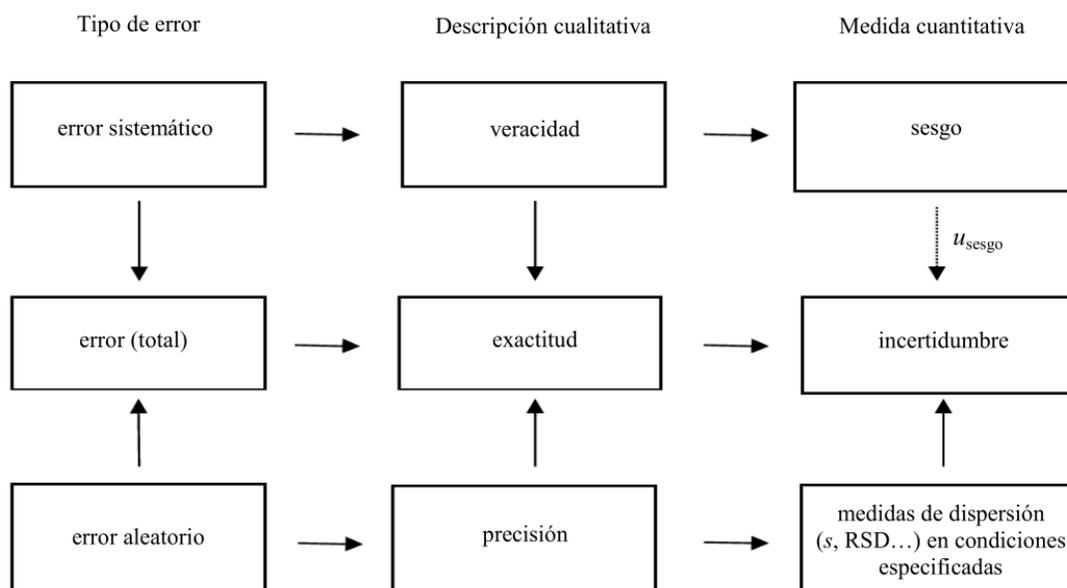
Según Delgado (2009) para realizar la verificación de un procedimiento normalizado no se necesita realizar evaluaciones rigurosas, es decir, un laboratorio no necesita validar si utiliza procedimientos normalizados. Lo que es de vital importancia, es registrar todos los resultados obtenidos durante la verificación para presentarlas como evidencias objetivas durante un proceso de acreditación.

### Parámetros de verificación

La verificación del procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas se realizó a través del estudio de dos componentes: ‘veracidad’ y ‘precisión’, por lo general se usan otros conceptos, como error sistemático y error aleatorio respectivamente. Es por ello que la figura 12 muestra de manera clara para evitar confusiones, los diferentes términos empleados que describen la calidad de los resultados de medición (EURACHEM, 2016)

**Figura 12**

*Conceptos fundamentales sobre la calidad de los resultados de medición.*



Fuente: EURACHEM (2016).

## **Norma NTP ISO/IEC 17025:2017**

La norma NTP ISO/IEC 17025:2017 fue realizada por el comité técnico de normalización de evaluación de la conformidad y aprobada por la dirección de Normalización del INACAL su objetivo es brindar los requisitos generales para que los laboratorios que ejecutan ensayos, calibración o muestreo demuestren competencia técnica, a través del cumplimiento de sus requisitos.

## **Dirección de metrología del INACAL**

En nuestro país, es el organismo responsable de difundir del Sistema Legal de Unidades de Medida. Se encarga de proteger y custodiar los patrones nacionales de medida, permitiéndonos obtener trazabilidad metrológica al Sistema Internacional de Unidades de Medida (SI) a través de la ejecución de servicios de calibración.

## **PC-025 Procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas**

Es un procedimiento elaborado por la Dirección de Metrología del INACAL en enero del 2019 donde se establece las acciones a ejecutar para realizar la calibración de pinzas amperimétricas. El documento se puede conseguir a través de la tienda virtual del INACAL.

## **Centro Español de Metrología (CEM)**

El Centro Español de Metrología (CEM) es el organismo de mayor autoridad en el campo de la Metrología en España. Dentro de sus labores destacan la custodia, realización y mantenimiento de los patrones de las unidades de medida conforme al Sistema Internacional de Unidades (SI), así como su propagación. (CEM, 2019)

## **EL-007 Procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas**

Es un procedimiento de calibración elaborado por el Centro Español de Metrología – CEM en el año 2008, dicho procedimiento establece la sistemática para ejecutar la calibración de pinzas amperimétricas. El documento puede descargarse de manera gratuita en la página web del CEM.

## Equipamiento

Según la cláusula 6.4 del apartado 6 – Requisitos relativos a los recursos de la norma NTP ISO/IEC 17025:2017, el laboratorio debe contar con acceso a equipamiento adecuado para realizar sus actividades. Es por ello que para realizar la calibración de pinzas amperimétricas se utilizó el equipamiento indicado en la tabla 3.

**Tabla 3**

*Equipamiento utilizado para la calibración de pinzas amperimétricas.*

| Equipo                           | Marca      | Modelo | Código     | Aplicación                             |
|----------------------------------|------------|--------|------------|--|
| Calibrador Multifunción          | TRANSMILLE | 3041A  | ELP.PT.042 | Generador de corriente                 |
| Estación de trabajo multifunción | TRANSMILLE | EA015  | ELP.PT.043 | Bobina multiplicadora                  |
| Termohigrómetro                  | CENTER     | 342    | ELP.PT.036 | Registrador de condiciones ambientales |

### a) Calibrador multifunción

El calibrador multifunción de la marca TRANSMILLE, modelo 3041A genera diversas magnitudes eléctricas tales como voltaje alterno, voltaje continuo, corriente alterna, corriente continua, resistencia, frecuencia y capacitancia. Ver figura 13.

**Figura 13**

*Calibrador Multifunción TRANSMILLE 3041 A.*



## b) Estación de trabajo multifunción

La estación de trabajo multifunción de la marca TRANSMILLE, modelo EA015 cuenta con múltiples funciones, tales como calibración de resistencia de aislamiento, continuidad, calibración de tacómetro óptico, simulación de termopar, generación de corriente y voltaje. Para el caso de la calibración de pinzas amperimétricas se utiliza las bobinas multiplicadoras de corriente de 2, 10 y 50 vueltas en función del nivel de corriente que se desea generar. Ver figura 14.

### Figura 14

*Estación de trabajo Multifunción TRANSMILLE EA015.*



## c) Termohigrómetro

El termohigrómetro de la marca CENTER, modelo 342 se utiliza para monitorear y registrar las condiciones ambientales en el laboratorio durante la calibración de pinzas amperimétricas. En este caso se considerará solo la temperatura (°C) y la humedad relativa (%HR). Ver figura 15.

### Figura 15

*Termohigrómetro CENTER 342.*



Un punto muy importante a considerar en el equipamiento es que este cuente con la trazabilidad metrológica correspondiente, de esa forma los resultados de medición serán trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI). En el caso del calibrador multifunción y la estación de trabajo, los resultados de calibración contenidos en los certificados de calibración son trazables al SI a través del NPL (National Physical Laboratory – Reino Unido).

### 2.2.3. Estadística aplicada en metrología

#### Media

La media o promedio, se puede calcular al dividir la suma de n mediciones realizadas entre el valor de n, tal como muestra la ecuación (1) (Mendenhall et al., 2010).

$$\text{Media muestral} = \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1)$$

Donde:

$x_i$  = Valor de una medición.

n = Número de lecturas realizadas.

#### Varianza

La varianza de una muestra, se puede calcular al dividir la suma de las desviaciones elevadas al cuadrado de las mediciones respecto a la media entre el número de lecturas realizadas menos 1, tal como muestra la ecuación (2). La varianza muestral se representa como  $s^2$  (Mendenhall et al., 2010).

$$\text{Varianza} = s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (2)$$

#### Desviación estándar

La desviación estándar se calcula como la raíz cuadrada de la varianza de un conjunto de mediciones, tal como muestra la ecuación (3). La desviación estándar se representa como "s" (Mendenhall et al., 2010).

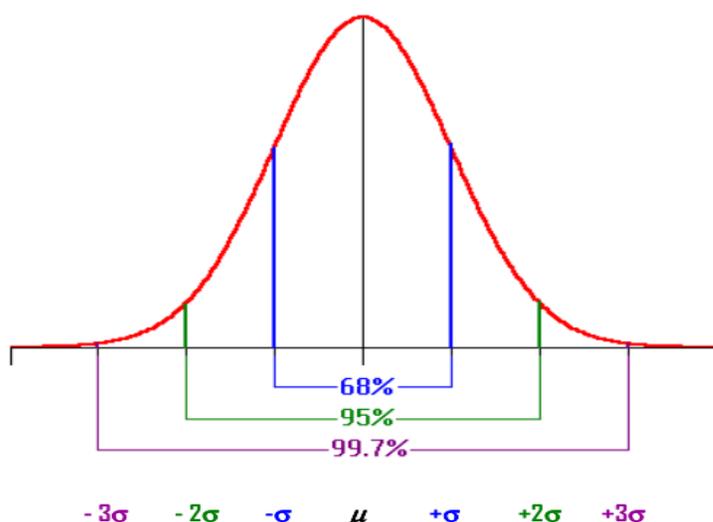
$$\text{Desviación estándar} = s = \sqrt{s^2} \quad (3)$$

## Distribución Normal

La distribución normal conocida también como distribución Gaussiana, está determinada por dos parámetros, su media y su desviación estándar, denotadas por  $\mu$  y  $\sigma$ . Su expresión gráfica es una curva normal (ver figura 16), cuya forma es similar a una campana de gauss que es simétrica respecto a su media y asintótica al eje de abscisas, esto hace que cualquier valor entre  $-\infty$  y  $+\infty$  es teóricamente posible. El área total bajo la curva es, por tanto, igual a 1 (Instituto de Salud Pública de Chile, 2010, p. 10)

**Figura 16**

*Gráfica de una curva normal.*



*Nota.* La probabilidad de que  $X_0$  se encuentre en el intervalo comprendido entre  $\mu \pm \sigma$  es aproximadamente 68,27%. La probabilidad de que  $X_0$  se encuentre en el intervalo comprendido entre  $\mu \pm 2\sigma$  es aproximadamente 95,45%. La probabilidad de que  $X_0$  se encuentre en el intervalo comprendido entre  $\mu \pm 3\sigma$  es aproximadamente 99,73%. Fuente: Instituto de Salud Pública de Chile (2010).

## Factor de cobertura (k)

El factor de cobertura, más conocido como el valor “k” es número utilizado para multiplicar la incertidumbre típica combinada, y así obtener la incertidumbre expandida. Es muy común que en los certificados de calibración se declare un valor de  $k = 2.00$  (JCGM, 2008).

## **Nivel de significancia ( $\alpha$ )**

El nivel de significancia o nivel alfa ( $\alpha$ ) se utiliza para calcular el nivel de confianza cuando se realizan pruebas estadísticas. El cálculo del nivel de confianza es igual a:  $100\% (1 - \alpha)$ , es decir, para un valor de alfa ( $\alpha$ ) de 0,05 se obtiene un nivel de confianza del 95% (Instituto de Salud Pública de Chile, 2010).

## **Pruebas de Significancia**

De manera habitual se emplean pruebas de significancia estadísticas para realizar el proceso de verificación de procedimientos o métodos, aplicándose por lo general las siguientes:

1. Prueba t- student para determinar errores sistemáticos (sesgo).
2. Prueba F-Fisher para determinar errores aleatorios (precisión).

El objetivo de realizar una prueba de significancia es determinar la veracidad de una hipótesis, existen dos tipos de hipótesis: Hipótesis Nula ( $H_0$ , No hay diferencias significativas entre grupos) y la Hipótesis alternativa ( $H_1$ , Sí hay diferencias significativas entre grupos). En cuanto al contraste de la hipótesis se considera según la hipótesis alternativa el número de colas. Es decir, si la hipótesis alternativa lleva el término “mayor que” o “menor que”, la prueba es de solo una cola, pero si la hipótesis alternativa lleva el término “no es igual que”, la prueba es de dos colas (Comité Técnico de acreditación de Laboratorios clínicos, 2021)

## **Prueba t-Student**

La prueba t-student facilita la comparación de medias de dos grupos de datos y determina si entre estos parámetros existen diferencias estadísticamente significativas. Para realizar la prueba t, primero se obtiene el valor t de student experimental, conseguido a partir de los resultados obtenidos durante la experimentación con un grupo, luego ese valor se compara con el valor t crítico, obtenido de la tabla de t-student para un determinado nivel de confiabilidad (95%, es decir, un valor  $\alpha$  de 0,05). En el caso de que no existan diferencias significativas entre 2 grupos, se cumple que el valor del t calculado es inferior al t crítico (Comité Técnico de acreditación de Laboratorios clínicos, 2021)

## **Prueba F (de Fisher)**

La prueba F permite contrastar la hipótesis de igualdad de las medias de más de dos grupos, basándose en la relación entre la variación por las diferencias entre grupos y la variación individual. Si el valor del  $F_{\text{calculado}}$  es mayor al  $F_{\text{crítico}}$ , se rechaza la hipótesis nula, sobre igualdad en la media entre los grupos. Pero si el valor del  $F_{\text{calculado}}$  es menor al  $F_{\text{crítico}}$ , no se rechaza la hipótesis nula y se considera que las medias son iguales (Comité Técnico de acreditación de Laboratorios clínicos, 2021)

## **Error normalizado**

Mendoza et al. (2009) menciona que el error normalizado (En) es el criterio más empleado en las comparaciones entre laboratorios, considerando las siguientes suposiciones:

- Los laboratorios participantes presentan sus resultados de medición bajo una distribución normal.
- El factor de cobertura con el que se expresan las incertidumbres de medición, tanto para los resultados de los participantes y la del laboratorio de referencia es el mismo ( $k=2$ ).

### **2.2.4. Estimación de la incertidumbre de medición**

Pérez (2012) menciona la posibilidad de agrupar en dos tipos las componentes de incertidumbre de medición: la incertidumbre tipo A y la incertidumbre tipo B. Se debe tener en cuenta que ambas componentes son distribuciones de probabilidad y la clasificación no implica una diferencia en la naturaleza entre las componentes, únicamente se trata de dos maneras diferentes para estimar las componentes de incertidumbre.

#### **a) Evaluación de la incertidumbre tipo A**

Schimid & Lazos (2000) mencionan que la incertidumbre tipo A se logra obtener a través de observaciones repetidas en condiciones de repetibilidad. Si  $X_i$  se determina por “n” mediciones independientes, resultando en valores  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , el mejor valor estimado  $x_i$  para el valor de  $X_i$  es la media de los resultados individuales. La dispersión de los resultados de la medición  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , para la magnitud de entrada  $X_i$  se formula por su desviación estándar experimental.

La ecuación (4) muestra la desviación estándar experimental.

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (4)$$

Finalmente, la incertidumbre estándar  $u(x_i)$  de  $X_i$  se calcula mediante la ecuación (5).

$$u(x_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

Donde:

$X_i$  = magnitud de entrada.

$x_i$  = mejor valor estimado.

$q_j$  = Observación número  $j$  de la variable  $q$ .

$\bar{q}$  = Media de la variable  $q$ .

$n$  = Número de observaciones.

## b) Evaluación de la incertidumbre tipo B

La incertidumbre tipo B es cuantificada empleando información obtenida por experiencia o de manera externa. Estas fuentes de información pueden ser: Valores de mediciones históricas, características del sistema de medición, Normas técnicas, Certificados de calibración, especificaciones del instrumento dadas por el fabricante (Schimid & Lazos, 2000)

### Distribución normal

Según Schmid & Lazos (2000) los resultados que se obtienen de una serie repetida de mediciones afectadas por una o varias magnitudes de influencia las cuales varían aleatoriamente, por lo general se comportan como una distribución normal. Considerando esta propiedad se calculó el aporte por incertidumbre del patrón utilizado para realizar la calibración de pinzas amperimétricas, simplemente realizando la división entre la incertidumbre expandida ( $U$ ) reportada en el certificado de calibración del patrón y el factor de cobertura ( $k$ ) asociado a un nivel de confianza (por lo general 95 %). Ver ecuación (6).

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad (6)$$

### **Distribución rectangular**

Schimid & Lazos (2000) manifiestan que en una distribución rectangular cada valor en un intervalo dado tiene la misma probabilidad, o sea la función de densidad de probabilidad es constante en este intervalo. Si la magnitud de entrada  $X_i$  tiene una distribución rectangular con el límite superior  $a_+$  y el límite inferior  $a_-$ , el mejor estimado para el valor de  $X_i$  se calcula mediante la ecuación (7).

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad (7)$$

Para calcular la incertidumbre estándar se utiliza la ecuación (8).

$$u(x_i) = \frac{a_+ + a_-}{\sqrt{12}} \quad (8)$$

Considerando que  $a = a_+ + a_-$  y el valor del semiancho del intervalo es  $a/2$ , la ecuación (9) muestra la forma final en la que se calcula el aporte de incertidumbre para una distribución rectangular.

$$u(x_i) = \frac{a/2}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

En el presente trabajo de investigación se consideró la resolución del ítem de calibración, la temperatura de funcionamiento del instrumento a calibrar y las especificaciones técnicas del equipamiento como distribuciones rectangulares.

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Descripción de la metodología**

##### **Enfoque**

Según Hernández y Mendoza (2018) el enfoque de investigación seguida en esta tesis es del tipo mixto, esto significa que es una combinación entre una investigación cualitativa y una investigación cuantitativa, debido a que se realiza la recolección y el análisis de datos cualitativos y cuantitativos, para su integración y discusión en conjunto.

El presente estudio tiene un enfoque cualitativo debido a que en la etapa de elaboración del procedimiento de calibración se investigó y recopiló datos sobre los procedimientos desarrollados por otros laboratorios, de esa forma se logró resumir y explicar de manera detallada los pasos para ejecutar la calibración de una pinza amperimétrica, tales como: las secuencias a realizar, criterios utilizados, el tipo de conexiones a realizar, etc.

También presenta un enfoque cuantitativo porque en las etapas para determinar la CMC, verificación del método y evaluación del desempeño se utilizaron herramientas matemáticas y estadísticas para: hallar la incertidumbre y el error de medición, estudiar la veracidad y precisión, determinar el desempeño del método, los cuales no se hubieran logrado analizar si no se contaban con los datos correspondientes.

##### **Tipo**

Según Ander (2011) la investigación aplicada trata de investigaciones enfocadas a la resolución de problemas, caracterizado por un interés en la aplicación y uso de conocimientos.

Por consiguiente, el tipo de investigación es aplicada, dado que se aplicó la teoría de procedimientos de calibración validados y herramientas estadísticas para lograr mejorar el alcance de acreditación de la empresa metrológica.

## **Diseño**

Hernández y Mendoza (2018) definen el diseño no experimental como una investigación en la que las variables no se manipulan intencionalmente, lo que se efectúa es la observación o medición de variables tal como se presentan en su contexto natural, para analizarlo. Asimismo, debido a que la recolección de los datos es un solo momento, la investigación es transversal.

Por lo tanto, el presente trabajo de investigación fue de diseño no experimental, transversal debido a que no se manipularon deliberadamente las variables, además los datos obtenidos en el proceso de medición se consiguieron en un único tiempo de diferentes participantes en un momento dado, para luego analizar los datos y sacar conclusiones.

## **Nivel**

Según Hernández y Mendoza (2018) un estudio descriptivo tiene como finalidad especificar propiedades y características de fenómenos, variables o eventos en un determinado contexto. Es decir, se mide, recolectan datos y se reporta información sobre conceptos, variables o componentes del problema a investigar.

Por consiguiente, el presente trabajo de investigación posee un nivel de investigación descriptivo, debido a que se describe una situación tal como se presenta en la realidad, sin intentar probar una relación causal. De manera puntual durante la investigación se realizaron mediciones y recolectaron datos, examinando y comprendiendo posibles obstáculos para luego optimizar diferentes aspectos técnicos, tales como: el procedimiento de calibración, el proceso de elaboración y validación de hoja de cálculo, elaboración de la CMC, verificación del procedimiento y evaluación del desempeño, logrando un mayor alcance de acreditación para la empresa metrológica.

Por otra parte, se resalta que el presente trabajo de investigación se desarrolló sin formulación de hipótesis dado que los estudios descriptivos no suelen incluir hipótesis, a partir de lo cual Hernández y Mendoza (2018), señalan que " las investigaciones cuantitativas que formulan hipótesis son solamente aquellas que tienen un alcance correlacional o explicativo, o las que tienen un alcance descriptivo, pero que intentan pronosticar una cifra, un dato o un hecho"(p.124).

### ***3.1.1. Etapas del desarrollo de la tesis***

Etapas para mejorar el alcance de acreditación de una empresa metrológica que realiza la calibración de pinzas amperimétricas.

1. Investigación de documentos de referencia.
2. Elaboración del procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas.
3. Elaboración de la hoja de cálculo para emisión de resultados.
4. Validación de la hoja de cálculo.
5. Determinación de la Capacidad de Medición y Calibración (CMC).
6. Evaluación de la veracidad.
7. Evaluación de la precisión.
8. Evaluación del desempeño del laboratorio
9. Presentación de resultados ante organismo acreditador.
10. Testificación del método de calibración en auditoría externa.

En la etapa 1, se realizó la búsqueda e investigación de documentos de referencia para lograr implementar el procedimiento de calibración, la elaboración y presentación de la CMC, la verificación del método y la evaluación del desempeño. En la etapa 2 se realizó únicamente el procedimiento para realizar la calibración de pinzas amperimétricas, teniendo como principales referencias bibliográficas el PC-025 Procedimiento de calibración de pinzas amperimétricas del INACAL y el Procedimiento EL-007 para la calibración de pinzas amperimétricas del CEM, ambos procedimientos corresponden a los Institutos Nacionales de Metrología de Perú y España respectivamente. Para mantener la misma estructura que los procedimientos de calibración de referencia, el documento se elaboró de la siguiente manera: objeto, alcance, equipamiento, preparación del ítem y del equipamiento, condiciones ambientales, medidas de seguridad, secuencias de calibración, selección de puntos de calibración, esquemas de conexiones y tratamiento de datos, donde se detalla los cálculos necesarios para obtener la incertidumbre y error de medición. El objetivo de contar con el procedimiento de calibración es asegurar que el personal que realiza la calibración lo ejecute de manera eficiente. Además, se busca estandarizar el proceso dentro del laboratorio para obtener resultados confiables.

En la etapa 3, luego de contar con el procedimiento de calibración, se procedió a diseñar la hoja de cálculo para que realice todos los cálculos de manera automática, simplemente ingresando los datos más básicos del ítem de calibración, el resultado se reportará por medio de un certificado de calibración el cual cumple con todos los requisitos indicados en la norma NTP ISO/IEC 17025:2017.

En la etapa 4, se procedió a validar la hoja de cálculo para dar fiabilidad a los resultados entregados en los certificados de calibración, ya que en el proceso de diseño pudieron haber ocurrido ciertos errores en algunos cálculos, de esta forma validaremos que los resultados entregados por la hoja de cálculo son los mismos que entrega el software de validación. En la etapa 5 se determinó la Capacidad de medición y calibración (CMC). Luego de elaborar el procedimiento de calibración y el formato del certificado de calibración en una hoja de cálculo, es necesario determinar cuál es el CMC del laboratorio, para ello se utilizó la data de todos los instrumentos que el laboratorio haya calibrado anteriormente y se realizaron los certificados de calibración en todos los puntos posibles. El objetivo es determinar los mejores valores de incertidumbre que el laboratorio de ELICROM PERÚ puede entregar en condiciones normales.

La CMC del procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas de ELICROM PERÚ se encuentra publicada en la página web del organismo acreditador (A2LA).

En la etapa 6 y 7 se realizó la verificación del método de calibración. Luego de obtener el CMC del laboratorio, se procedió a realizar la verificación del método, para comprobar que se está aplicando de manera correcta el procedimiento implementado el cual ya ha sido validado por los laboratorios del INACAL y el CEM. El estudio de la verificación del método se realizó a través de los parámetros de veracidad y la precisión.

En la etapa 8 se realizó la evaluación de desempeño del método. Al finalizar la etapa de verificación del método, se puede concluir si el personal del laboratorio trabaja correctamente, cumpliendo con lo establecido en el procedimiento de calibración, sin embargo, es importante para cualquier laboratorio de calibración participar en comparaciones interlaboratorio para determinar el desempeño del laboratorio frente a otros laboratorios que realizan la calibración de pinzas amperimétricas.

Para elaborar esta tesis se utilizaron los resultados obtenidos en el interlaboratorio organizado por la Dirección de metrología del INACAL para evaluar el desempeño del método.

Las etapas finales 9 y 10 son las que corresponden al proceso de acreditación. En la etapa de presentación de resultados ante organismo acreditador, se envían todas las evidencias necesarias para que el organismo acreditador evalúe el cumplimiento de la parte documentaria (contar con un procedimiento de calibración, contar con trazabilidad metrológica, certificados de calibración de patrones, etc.). Luego de pasar por esa etapa, finalmente se realiza una testificación del procedimiento de calibración en una auditoría externa, donde básicamente un experto técnico evalúa la competencia técnica del laboratorio para ejecutar los servicios de calibración.

## **3.2. Implementación de la investigación**

### **3.2.1. Procedimiento de calibración**

#### **Objeto**

El presente procedimiento establece las acciones necesarias para ejecutar la calibración de pinzas amperimétricas, también conocidas como tenazas amperimétricas (INACAL, 2019).

#### **Alcance**

El presente procedimiento aplica a pinzas amperimétricas digitales, en su función de medición de corriente continua y alterna por medio de sus tenazas, mediante el uso de un calibrador multifunción, el cual puede generar corrientes de hasta 20 A y una estación de trabajo multifunción, con una bobina de corriente de 50 vueltas, la cual es utilizada para lograr un efecto multiplicativo, de manera que el valor de corriente aplicado a la pinza amperimétrica cuando se coloca en el centro de la bobina de corriente es igual a la corriente entregada por la fuente de corriente multiplicado por el número de vueltas de la bobina, siendo posible realizar la calibración de estos instrumentos hasta corrientes de 1000 A (INACAL, 2019)

## Método de calibración

La calibración de las pinzas amperimétricas se realizará por el método indirecto, esto consiste en generar una corriente conocida mediante el calibrador multifunción para luego aplicarla a una bobina de corriente, de tal forma que debido al efecto multiplicativo se logrará obtener una corriente igual a la corriente generada por el calibrador multifunción multiplicado por el número de vueltas de la bobina.

La figura 17, muestra la bobina multiplicadora de 50 vueltas recibiendo una corriente alterna de 1 A - 60 Hz entregada por el calibrador multifunción. El valor nominal aplicado es una corriente alterna de 50 A - 60 Hz y se puede observar que la lectura en la pinza amperimétrica es de 49,3 AC.

### Figura 17

*Efecto de la bobina multiplicadora de 50 vueltas.*



Se debe resaltar que el método indirecto implica hacer uso de un calibrador multifunción y de una bobina desarrollados por el mismo fabricante, debido a que es necesario conocer el efecto del calibrador junto con la bobina de corriente para realizar el cálculo de incertidumbre. Sin embargo, es posible que se pueda diseñar o utilizar una bobina de corriente diferente a la marca del calibrador multifunción, pero se deberá evaluar el efecto multiplicativo, lo que dificulta la implementación del procedimiento.

También es posible realizar la calibración de pinzas amperimétricas usando solamente un cable de corriente tipo banana-banana que soporte hasta 20 A, este se conectará al Calibrador multifunción como cortocircuito a su salida de corriente, permitiendo calibrar pinzas amperimétricas que miden corrientes inferiores a 20 A (INACAL, 2019)

Finalmente, se indica que el presente procedimiento permite la calibración de pinzas amperimétricas con capacidad para medir magnitudes en los siguientes rangos:

**a) Empleando un calibrador (fuente de corriente) con cable en cortocircuito a su salida.**

Corriente continua desde 2,1 mA hasta 20 A.

Corriente alterna a 60 Hz desde 3 mA hasta 20 A.

**b) Empleando un calibrador (fuente de corriente) y bobina de corriente.**

Corriente continua: desde 1 A hasta 1000 A.

Corriente alterna a 60 Hz desde 0,3 A hasta 1000 A.

## **Equipamiento**

Según la cláusula 6.4 de la norma NTP ISO/IEC 17025:2017, el laboratorio debe tener acceso a equipamiento adecuado para realizar sus actividades. Es por ello que para realizar la calibración de pinzas amperimétricas se utilizó el equipamiento que se muestra en la tabla 3.

El equipamiento seleccionado cumple con los requisitos de exactitud, incertidumbre, trazabilidad metrológica, etc. En el Anexo C, se muestra las especificaciones técnicas del equipamiento dadas por el propio fabricante.

Un punto muy importante a considerar en el equipamiento es que este cuente con la trazabilidad metrológica correspondiente, de esa forma se asegura que los resultados de medición son trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI), a través de una cadena ininterrumpida documentada de calibraciones. Para el caso del calibrador multifunción y la estación de trabajo, los resultados de calibración contenidos en los certificados de calibración son trazables al SI por medio de una cadena ininterrumpida de calibraciones a través del NPL (National Physical Laboratory – Reino Unido). En el Anexo D se muestra los certificados de calibración del calibrador multifunción y la estación de trabajo.

## **Materiales y/o equipos auxiliares**

### **➤ Necesarios**

- Un PC para registrar las mediciones durante el proceso de calibración.
- Cables de baja resistencia Transmille para las conexiones entre el calibrador y la bobina de corriente del tipo banana-banana de longitud corta que soporten corrientes hasta 30 A.
- Tapete electrostático y Pulsera antiestática.
- Estabilizador AVR (Automatic Voltage Regulator).

### **➤ Opcionales**

- Paños de papel toalla.
- Alcohol isopropílico.
- Set de destornilladores.

Se debe emplear alcohol isopropílico y paños, cuando sea necesario limpiar los patrones de medición, ítem de calibración o accesorios utilizados.

Se empleará 1 set de destornilladores para la apertura del ítem en caso sea necesario un cambio de fusibles o batería.

## **Preparación del ítem y del equipamiento**

Los siguientes puntos indican las acciones que se deben realizar antes de realizar el proceso de calibración, estos se basan en las consideraciones generales del PC-025 Procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas del INACAL.

- a) Comprobar que la pinza amperimétrica está correctamente identificada de forma permanente con su marca, modelo y número de serie correspondiente, o con un código interno del propietario. De no ser así, se le debe asignar un código de identificación que se adherirá de forma segura sobre la pinza amperimétrica. Los datos de identificación mencionados anteriormente pueden encontrarse grabados sobre el propio ítem, normalmente en su cuerpo, o bien sobre su estuche, siendo deseable que la identificación figure en ambos lugares y si sólo figura en uno de ellos es mejor que sea en el ítem.

- b) Disponer en lo posible del manual de operación de la pinza amperimétrica a calibrar para familiarizarse con su manejo y fijar los errores máximos permitidos del instrumento según el fabricante, adicional se debe disponer de las instrucciones de ajuste del fabricante, si las hubiese, por si en el transcurso de la calibración se determina la necesidad de realizar ajustes a la pinza amperimétrica. Cualquier duda de su manejo debe ser aclarada antes de realizar la calibración.
- c) Comprobar que el fusible de la pinza amperimétrica se encuentra en buen estado, siguiendo las instrucciones del manual, de no ser así, se debe proceder a su sustitución.
- d) Comprobar que la batería de la pinza amperimétrica se encuentra en buen estado y en caso de ser necesario se procederá a su sustitución. Considerar que las baterías se encuentren por lo menos al 85% de su carga máxima.
- e) Comprobar el correcto cierre de una mordaza contra la otra, así como el estado superficial de las dos caras accesibles del circuito magnético. Si las tenazas se encuentran rotas o con rajaduras no será posible la calibración de la pinza amperimétrica.
- f) Comprobar que el calibrador multifunción y la estación de trabajo, cuenten con un certificado de calibración vigente, el cual habrá sido emitido por un laboratorio acreditado o por un laboratorio nacional. Dicho certificado debe garantizar la trazabilidad e incertidumbres apropiadas a las mediciones que se van a realizar en el transcurso de la calibración.
- g) Comprobar que el equipamiento utilizado se encuentre conectado al AVR (Automatic Voltage Regulator), esto asegurara que el valor nominal de la tensión de alimentación y las posibles variaciones son las adecuadas para su correcto funcionamiento. Normalmente una tensión de 220 VAC  $\pm$  10 % es adecuada para el funcionamiento de la mayoría de los equipos. En cualquier caso, consultar el manual de instrucciones del calibrador multifunción.
- h) Comprobar que el calibrador multifunción y la estación de trabajo multifunción están conectados a un punto de tierra como medida elemental de protección frente a contactos indirectos.
- i) Encender el calibrador multifunción y la estación de trabajo multifunción, durante un tiempo previo al inicio de la calibración para conseguir la estabilización térmica. El tiempo de estabilización térmica cambia de un instrumento a otro, pero como regla general es un mínimo de 30 minutos.

- j) Situar tanto la pinza amperimétrica como el equipamiento utilizado en la calibración, alejados de cualquier fuente de calor o de otros instrumentos que puedan inducir interferencias electromagnéticas.
- k) Realizar las pruebas iniciales descritas en el manual de la pinza amperimétrica a calibrar, encaminadas a comprobar el estado general de funcionamiento de la pinza amperimétrica (por ejemplo: autotest de encendido, comprobación de la pantalla de visualización, etc.).
- l) Desmagnetizar el núcleo de las pinzas amperimétricas de corriente continua previo al inicio de la calibración, para ello, después de aplicar una corriente próxima al fondo de escala de la pinza amperimétrica se debe retirar la pinza amperimétrica de la bobina, se abrirá y cerrarán sus tenazas (mordazas) de forma brusca de tres a cinco veces.
- m) Orientar las pinzas amperimétricas de corriente continua de forma que las lecturas sean positivas. En caso de observar una lectura negativa será necesario orientar la pinza de forma que cambie su polaridad.

### Condiciones ambientales

El CEM (2008) indica que la calibración se debe realizar manteniendo una temperatura ambiente comprendida entre 18 °C y 28 °C, que es el margen normal en el que los patrones empleados mantienen sus especificaciones. La humedad relativa no debe sobrepasar del 70%, aunque en algunos casos es posible admitir valores de hasta el 80 % (se debe revisar en esa situación los manuales del equipamiento utilizado).

Tomando en cuenta estas recomendaciones, se definen las condiciones ambientales, según la tabla 4.

**Tabla 4**

*Condiciones ambientales para la calibración de pinzas amperimétricas.*

| <b>Condición ambiental</b> | <b>Valores comprendidos entre</b> |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Temperatura ambiente       | 18°C y 28°C                       |
| Humedad relativa           | 45 %HR y 80 %HR                   |

Las condiciones ambientales se deben registrar al inicio y al final de la calibración, se calculará el promedio de estos dos valores y posteriormente se hallará su valor corregido. En caso de que las condiciones ambientales no se encuentren en su rango se detendrá la calibración y se esperará a que se normalice, una vez estables, se continuara la calibración desde el punto donde se detuvo.

### **Medidas de seguridad**

Se debe tener en cuenta que, tanto en el calibrador multifunción como en el ítem de calibración, se pueden presentar en sus terminales externos o de manera interna tensiones peligrosas para el personal que realizan las acciones de calibración, ajuste y comprobación. Para evitar accidentes, se debe cumplir con las acciones elementales de precaución para la ejecución de trabajos de riesgo eléctrico aquí mencionadas y de manera complementaria, se debe tomar como referencia las instrucciones facilitadas por el fabricante en el manual (CEM, 2008)

Las medidas elementales de seguridad que se mencionan a continuación tienen como referencia las recomendaciones mencionadas en el Procedimiento EL-007 para la calibración de pinzas amperimétricas del CEM y las observaciones realizadas por auditores especialistas en parámetros eléctricos durante las auditorías externas recibidas en la sede matriz del laboratorio de calibración.

- a) No realizar ninguna conexión a los bornes de salida del calibrador si hay señal presente en esos bornes. Antes de realizar cualquier conexión eléctrica a los bornes del calibrador, presionar la tecla STANDBY y comprobar que la señalización indica que no hay señal en los bornes del calibrador (señalización STANDBY).
- b) Utilizar los siguientes dispositivos de protección de Descargas Electro Estáticas (ESD): Pulsera antiestática y Tapete electroestático.
- c) Utilizar los cables proporcionados por el fabricante, aunque los colores de los cables indican el uso que se les dará, estos deben estar identificados de forma legible para su fácil reconocimiento en el uso de las funciones de corriente y corriente alta. En caso de no contar

con los cables de fabricante, se deben utilizar cables aislados adecuadamente que soporten como mínimo 2000 voltios a 60 Hz, asegurándose de que los terminales que se conecten a los bornes de conexión del equipamiento no presenten partes expuestas.

### **Secuencias de calibración**

Las secuencias que se mencionan a continuación tienen como referencia al Procedimiento EL-007 para la calibración de pinzas amperimétricas del CEM. El proceso de calibración deberá seguir una de las dos posibles secuencias mencionadas a continuación:

- 1) Verificación inicial – Ajuste - Calibración final.
- 2) Verificación inicial - Calibración sin ajustes.

En la secuencia 1) se realiza una verificación inicial, un ajuste y una calibración final. Si como consecuencia de la verificación inicial del ítem se evidencia la necesidad de un ajuste, se realiza dicho ajuste, seguido de una calibración final. La calibración final comprueba que los ajustes realizados son correctos. Se registrará en el certificado de calibración las lecturas realizadas antes y después del ajuste.

La secuencia 2) es aplicable cuando los errores encontrados en la verificación sean inferiores a unos límites establecidos, cuando no se disponga de autorización por parte del usuario para realizar el ajuste o cuando no sea posible realizar el ajuste del instrumento.

La verificación inicial consiste en seguir la sistemática de calibración, pero de una manera menos exhaustiva. Pueden elegirse por ejemplo los puntos extremos de calibración (el más bajo y el más alto) o un punto intermedio del intervalo de trabajo y determinar por simple cálculo matemático si el error de medición se encuentra dentro de las especificaciones dadas. En caso de incumplimiento, se informa al cliente para que autorice el ajuste de medida y se pueda proceder bajo su aprobación.

Los ajustes se deben realizar siempre siguiendo las indicaciones del manual de fabricante de la pinza, en el orden y en los puntos indicados. No obstante, este tipo de instrumentos al ser

de uso industrial y no de laboratorio, no suele disponer de posibilidad de ajuste en la inmensa mayoría de casos. Por lo tanto, cuando los errores de la calibración exceden el límite de tolerancia previsto, el cliente deberá enviar a reparar el instrumento o sustituirlo por uno nuevo lo cual resulta en la práctica mucho más sencillo.

### Selección de los puntos de calibración

La definición del conjunto de puntos de medida para la calibración de una pinza amperimétrica tiene como referencia al PC-025 Procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas del INACAL. Es necesario resaltar que los puntos de calibración deben ser lo suficientemente flexibles como para ser de aplicación a diferentes modelos.

Muchas veces, la selección de los puntos de calibración puede, a veces, obtenerse de las propias instrucciones del fabricante, aunque los puntos contenidos no deben ser necesariamente considerados como absolutos. Si el cliente desea otros puntos de calibración, estos se pueden considerar. Finalmente, los puntos de calibración para las pinzas amperimétricas se recogen en la tabla 5.

**Tabla 5**

*Puntos de calibración para pinzas amperimétricas de hasta 1000A.*

| <b>RANGOS</b>                            | <b>Nº PUNTOS</b> | <b>VALORES DE PRUEBA<br/>(% FONDO DE ESCALA)</b> |
|--|------------------|--|
| <b>Función corriente continua</b>        |                  |  |
| TODOS                                    | 5                | 10%; 30%; 50%; 70%; 90%                          |
| <b>Función corriente alterna (60 Hz)</b> |                  |  |
| TODOS                                    | 5                | 10%; 30%; 50%; 70%; 90%                          |

Las siguientes observaciones sirven para interpretar la tabla 5:

- a) Los puntos de calibración están indicados en tanto por ciento del fondo de escala de la pinza amperimétrica.

- b) Los valores indicados son valores aproximados recomendados que deben servir de referencia para elegir los puntos de calibración, estos deben cubrir razonablemente todo el rango de medida útil del instrumento y cuando hay más de dos, estar distribuidos de manera homogénea a lo largo de toda la escala.
- c) El valor del 10% indica un punto arbitrario situado al principio de la escala, el valor real puede variar hasta el 25% o 50%, con el objeto de que no se realice la calibración para un punto que se pueda medir en el rango inferior. Para instrumentos que cuentan con varios rangos de medición, por ejemplo, en corriente alterna cuentan con los rangos de medición de 40 A; 400 A; 1000 A, el valor del 10% del último rango (por ejemplo, de 1000 A) se podrá considerar como el valor del rango anterior (por ejemplo 400 A) o en todo caso el 50% del rango de medición. La siguiente consideración se debe tener en cuenta para evitar que se repitan puntos de calibración pertenecientes a otros rangos especialmente cuando se utilice la función de medición automática del instrumento. Esta consideración también puede ser aplicada para la función de medición de corriente continua.
- d) El valor del 90% indica un punto arbitrario situado próximo del fondo de escala, el valor real puede variar del 80% al 100% del fondo de escala. No obstante, cuando se trata de un rango en el que se está comprobando la linealidad (midiendo cinco puntos en el mismo rango), el valor del 10% y 90% se debe entender en sentido estricto. Con el calibrador multifunción con salida de corriente hasta 20 A y una bobina de corriente de 50 vueltas se obtendrá una corriente máxima de 1000 A ( $20 \text{ A} \times 50 = 1000 \text{ A}$ ). Entonces cuando se genere esta corriente máxima de 1000 A y el instrumento a calibrar registre un valor considerablemente menor a esta corriente (por ejemplo 800 A o 700 A), imposibilitando alcanzar el valor de 90% (900 A), en este caso la calibración será limitada hasta al valor que se pueda alcanzar en el instrumento a calibrar.
- e) El valor de frecuencia de 60 Hz está pensado para comprobar el funcionamiento de la pinza amperimétrica a frecuencia industrial, aunque el valor de la frecuencia de prueba puede variar entre 40 Hz y 60 Hz.

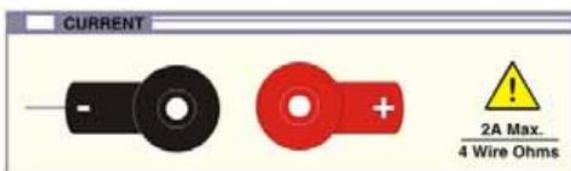
f) Finalmente, no se deben incluir medidas de corriente continua con polaridad negativa, ya que la mayoría de las pinzas no presentan esta posibilidad de medida. Cuando la lectura es negativa es suficiente con invertir la posición de la pinza para lograr una lectura positiva, con lo cual no se justifica la calibración en polaridad negativa.

### Esquema de conexiones y consideraciones para la calibración

Según los terminales del calibrador multifunción TRANSMILLE 3041A, se debe considerar lo siguiente: Para obtener corrientes menores o iguales a 2 A, en la salida del calibrador multifunción, los cables se deben conectar en los bornes de salida CURRENT Output Terminals – Black & Red. Ver figura 18.

#### Figura 18

*Current output Terminals (Black & Red)*

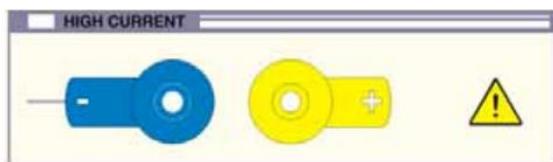


Fuente: Transmille (2012).

Para obtener corrientes superiores a 2 A hasta 20 A, en la salida del calibrador multifunción, los cables se deben conectar en lo bornes de salida HIGH CURRENT Output Terminals – Blue & Yellow. Ver figura 19.

#### Figura 19

*Current output Terminals (Blue & Yellow)*



Fuente: Transmille (2012).

Por lo tanto, según el valor de corriente que se desea aplicar a la pinza amperimétrica se realiza la conexión eléctrica. En la figura 20, se muestra por ejemplo la conexión para valores de corriente superiores a 100 A.

### Figura 20

*Conexión usando un calibrador multifunción y una bobina de corriente de 50 vueltas.*



*Nota.* Elaboración propia en base a información extraída de: <https://www.transmille.com/>

Si el punto de calibración se encuentra en el rango de mA, no será necesario utilizar la bobina de corriente. En su reemplazo se puede utilizar un cable de corriente (tipo banana-banana que soporte hasta 20 A) en cortocircuito a la salida de corriente del calibrador multifunción. Ver figura 21.

### Figura 21

*Esquema de conexión de una espira para calibración de pinza amperimétrica.*



*Nota.* Elaboración propia en base a información extraída de: <https://www.transmille.com/>

Para evitar errores inducidos por fuerzas electromotrices de origen térmico, es necesario usar conductores y conectores de cobre.

Los cables empleados en las mediciones de corriente alterna deben ser apantallados o coaxiales procurando que su longitud no exceda de 1 m. En caso de no contar con estos, es posible trenzar los cables para realizar las mediciones (INACAL, 2019)

### **Pasos para realizar la calibración**

Los pasos que se mencionan a continuación tienen como referencia al Procedimiento PC-025 Procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas del INACAL.

- a) Elegir los puntos de calibración teniendo en cuenta los rangos que posee la pinza amperimétrica. Se debe tener en cuenta si se usará el calibrador junto con la bobina de corriente o solo el cable de corriente en cortocircuito a la salida de corriente del calibrador.
- b) Conectar los cables de corriente a la salida del calibrador y a la entrada de la bobina de corriente o conectar el cable de corriente en cortocircuito a la salida de corriente del calibrador, según los valores de corriente elegidos.
- c) Colocar la pinza amperimétrica de tal manera que se encuentre lo más centrada posible en la bobina de corriente o al cable de corriente en cortocircuito a la salida del calibrador.
- d) Registrar las condiciones ambientales iniciales.
- e) En caso de que sea posible, se debe configurar la pinza amperimétrica en varias formas de medición (cambiando la resolución o la velocidad de medida, etc.), para realizar la calibración, según el manual del fabricante.
- f) Registrar, las configuraciones seleccionadas en la pinza amperimétrica a calibrar (resolución y rango), la lectura del patrón, para que aparezcan en el certificado de calibración. Si se va a utilizar el ítem en otras configuraciones, se debe comprobar el correcto funcionamiento de las mismas.
- g) Aplicar la corriente correspondiente al punto de calibración, se deben realizar cinco mediciones. En el caso de que una vez aplicado el nivel de señal con el calibrador no existan variaciones en la indicación de la pinza amperimétrica será suficiente con tomar una medición de dicha indicación invariable y repetir ésta hasta completar cinco lecturas en cada punto de calibración. En algunos casos, para corriente continua y alterna, es habitual que durante la calibración de este tipo de instrumentos no existan variaciones en la indicación del instrumento con lo cual se simplifica notablemente el proceso de calibración.

- h) Repetir los pasos los e, f y g para cubrir todos los puntos de calibración, asegurándose de presionar la tecla STANDBY y comprobar que la señalización que indica que no hay señal en los bornes del calibrador está activa (señalización STANDBY).
- i) Al concluir la calibración, registrar las condiciones ambientales finales y retirar la pinza amperimétrica.

### Estimación de la incertidumbre de medición

La ecuación (10) permite determinar el error  $e_M$ , de la indicación obtenida de la pinza amperimétrica a calibrar para corriente alterna y continua, empleando un calibrador multifunción y una bobina de corriente (INACAL, 2019).

$$e_M = (I_M + \delta I_M + \delta I_{MT}) - (n \times (I_P + \delta I_{PC}) + \delta I_{PME}) \quad (10)$$

Donde:

- $I_M$  Indicación de la pinza amperimétrica cuando se aplica la señal (corriente continua o alterna) con el calibrador y la bobina de corriente.
- $\delta I_M$  Corrección debida a la resolución de la pinza amperimétrica cuando se aplica la señal con el calibrador y la bobina de corriente ( $\overline{\delta I_M} = 0$ ).
- $\delta I_{MT}$  Corrección debida a la temperatura de funcionamiento de la pinza amperimétrica ( $\overline{\delta I_{MT}} = 0$ ).
- $n$  Número de vueltas de la bobina de corriente (por ejemplo,  $n=50$ ).
- $I_P$  Valor de la señal (corriente continua o alterna) aplicada con el calibrador.
- $\delta I_{PC}$  Corrección de la señal aplicada del calibrador debida a su calibración.
- $\delta I_{PME}$  Corrección de la señal aplicada del calibrador debida a múltiples efectos.

Para determinar el valor de  $\delta I_{PME}$ , se emplea la ecuación (11).

$$\delta I_{PME} = n \times (\delta I_{PD} + \delta I_{PLi} + \delta I_{PT} + \delta I_{PV} + \delta I_{PL} + \delta I_{PE}) + \delta I_{PIB} \quad (11)$$

Donde:

$\delta I_{PD}$  Corrección de la señal del calibrador debida a su deriva desde su última calibración ( $\overline{\delta I_{PD}} = 0$ ).

$\delta I_{PLi}$  Corrección de la señal del calibrador debida a su falta de linealidad ( $\overline{\delta I_{PLi}} = 0$ ).

$\delta I_{PT}$  Corrección de la señal del calibrador debida a la temperatura de funcionamiento ( $\overline{\delta I_{PT}} = 0$ ).

$\delta I_{PV}$  Corrección de la señal del calibrador debida a variaciones en la tensión de alimentación ( $\overline{\delta I_{PV}} = 0$ ).

$\delta I_{PL}$  Corrección de la señal del calibrador debida a los efectos de carga del instrumento a calibrar ( $\overline{\delta I_{PL}} = 0$ ).

$\delta I_{PE}$  Corrección de la señal del calibrador debida a la estabilidad ( $\overline{\delta I_{PE}} = 0$ ).

$\delta I_{PIB}$  Corrección de la señal aplicada del calibrador debida a la interacción de la pinza amperimétrica y la bobina de corriente con el calibrador ( $\overline{\delta I_{PIB}} = 0$ ).

Las barras sobre los símbolos significan sus valores más probables.

El valor más probable de las correcciones  $\delta I_M, \delta I_{MT}, \delta I_{PD}, \delta I_{PLi}, \delta I_{PT}, \delta I_{PV}, \delta I_{PL}, \delta I_{PE}, \delta I_{PIB}$  es nula pero sus respectivas incertidumbres no los son.

La señal aplicada con el calibrador ( $I_P$ ) es un valor nominal, es decir no varía por lo cual no genera incertidumbre alguna.

El error,  $e_M$ , de la indicación obtenida de la pinza amperimétrica a calibrar cuando no es necesario el uso de la bobina de corriente, es decir para  $n = 1$  y  $\delta I_{PIB} = 0$ , se obtiene mediante una simplificación de la ecuación (10), obteniendo la ecuación (12).

$$e_M = (I_M + \delta I_M + \delta I_{MT}) - (I_P + \delta I_{PC} + \delta I_{PME}) \quad (12)$$

Para la estimación de la incertidumbre se siguen las directrices de la Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). La ecuación (13) muestra la propagación de incertidumbre para una función  $y = f_{(x)}$ .

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \times u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \times u^2(x_i)} \quad (13)$$

Donde:

$u(x_i)$  Son las incertidumbres típicas asociadas a cada estimación de entrada  $x_i$  (provenientes de una distribución de valores posibles de cada magnitud de entrada  $X_i$ ) que contribuyen al resultado final (descritas por el modelo).

$c_i$  Son los coeficientes de sensibilidad (que describen cómo varía la estimación de salida  $y$ , en función de las variaciones en los valores de las estimaciones de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_N$ ). Se obtienen a partir de las derivadas parciales de la función con respecto a cada variable  $c_i \equiv \partial f / \partial x_i$ .

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres y suponiendo que no existe correlación entre las distintas variables, se obtiene la ecuación (14).

$$u^2(e_M) = c_1^2 \times u^2(I_M) + c_2^2 \times u^2(\delta I_M) + c_3^2 \times u^2(\delta I_{MT}) + c_4^2 \times u^2(\delta I_{PC}) + c_5^2 \times u^2(\delta I_{PME}) \quad (14)$$

### Cálculo de coeficientes de sensibilidad

Los coeficientes de sensibilidad se calculan como las derivadas parciales de  $e_M$ , respecto de cada una de las magnitudes evaluadas en el punto de calibración considerado. Ver ecuación (15)

$$c_1 = \frac{\partial e_M}{\partial I_M} = 1 ; \quad c_2 = \frac{\partial e_M}{\partial \delta I_M} = 1 ; \quad c_3 = \frac{\partial e_M}{\partial \delta I_{MT}} = 1$$

$$c_4 = \frac{\partial e_M}{\partial \delta I_{PC}} = -n ; \quad c_5 = \frac{\partial e_M}{\partial \delta I_{PME}} = -1 \quad (15)$$

Reemplazando y operando los coeficientes de sensibilidad de la ecuación (14), se obtiene, la ecuación (16).

$$u^2(e_M) = u^2(I_M) + u^2(\delta I_M) + u^2(\delta I_{MT}) + n^2 \times u^2(\delta I_{PC}) + u^2(\delta I_{PME}) \quad (16)$$

Donde:

- $u(I_M)$  Incertidumbre debida a la variación de las lecturas de la pinza amperimétrica.
- $u(\delta I_M)$  Incertidumbre debida a la resolución de la pinza amperimétrica.
- $u(\delta I_{MT})$  Incertidumbre debida a la temperatura de funcionamiento pinza amperimétrica.
- $u(\delta I_{PC})$  Incertidumbre de la señal aplicada del calibrador debida a la calibración.
- $u(\delta I_{PME})$  Incertidumbre de la señal aplicada del calibrador debida a múltiples efectos.

### Estimación de incertidumbres típicas

A continuación, se especifica cómo se obtienen las incertidumbres típicas para cada estimación de entrada, que contribuyen a la determinación de la incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$ . El análisis de cada una de las contribuciones tiene como referencia al PC-025 Procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas del INACAL.

#### a) Incertidumbre debida a la variación de las lecturas de la pinza amperimétrica a calibrar $u(I_M)$

La evaluación de las indicaciones de la pinza amperimétrica a calibrar se obtiene por sucesivas mediciones para cada valor de lectura, por lo tanto, se evalúa en forma estadística, obteniendo la ecuación (17).

$$u(I_M) = \frac{\sqrt{\frac{1}{m-1} \times \sum_{i=1}^m (I_{Mi} - \bar{I}_M)^2}}{\sqrt{m}} \quad (17)$$

Donde:

- $\bar{I}_M$  Es el valor medio de las indicaciones  $I_M$  del multímetro a calibrar.
- $I_{Mi}$  Es el valor de la indicación  $I_M$  de la pinza amperimétrica a calibrar por cada evento  $i$  evaluado bajo condiciones de repetibilidad.
- $m$  Es el total de eventos realizados en forma independiente, en este caso  $m=5$ .

**b) Incertidumbre debida a la resolución de la pinza amperimétrica a calibrar  $u(\delta I_M)$**

Esta contribución se aplica cuando las lecturas de la medición se toman directamente del indicador del instrumento a calibrar. Para instrumentos con indicación digital tenemos que, si designamos como  $a$  al valor de resolución requerido, tendríamos que la correspondiente incertidumbre estaría dada por la ecuación (18).

$$u(\delta I_M) = \frac{a}{2\sqrt{3}} \quad (18)$$

**c) Incertidumbre debida a la temperatura de funcionamiento de la pinza amperimétrica  $u(\delta I_{MT})$**

Su influencia en la incertidumbre es descrita por una contribución rectangular. Teniendo como coeficiente de temperatura  $C_{M0}$  (expresado en tanto por ciento de error por grados Celsius de temperatura) y una variación de temperatura  $\Delta T$  obtenida como la máxima diferencia, entre la temperatura de calibración y la temperatura existente en la calibración actual, la contribución a la incertidumbre estaría dada por la ecuación (19).

$$u(\delta I_{MT}) = \frac{C_{M0} \times \Delta T}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

**d) Incertidumbre de la señal aplicada del calibrador debida a la calibración  $u(\delta I_{PC})$**

Será la reflejada en el correspondiente certificado de calibración. En los certificados se indican incertidumbres expandidas  $U_P$  con un nivel de confianza de aproximadamente el 95%, correspondiente a una distribución normal  $k=2$ , para hallar la incertidumbre estándar será necesario dividir el valor indicado por el valor de  $k$  (normalmente 2). Ver ecuación (20).

$$u(\delta I_{PC}) = \frac{U_P}{k} \quad (20)$$

**e) Incertidumbre de la señal aplicada del calibrador debida a múltiples efectos  $u(\delta I_{PME})$**

Debido a que no es posible conocer normalmente cada una de las correcciones del patrón, tales como: linealidad, temperatura de funcionamiento, variaciones en la tensión de alimentación. Las componentes de incertidumbre asociadas a estos factores se pueden derivar de las especificaciones facilitadas por el fabricante para el calibrador multifunción. Cuando se utilice la bobina de corriente en conjunto con el calibrador, es necesario considerar la contribución de la carga o el efecto que se genera cuando se utiliza en conjunto con el calibrador multifunción y la bobina de corriente para generar corrientes hasta 1000A.

Para este caso es necesario adicionar a las especificaciones del calibrador, las especificaciones debidas a la interacción de la pinza y la bobina de corriente con el calibrador. Según el fabricante estas especificaciones están dadas según la ecuación (21).

$$\text{espec.} = \sqrt{(n \times S_{\text{calibrador}})^2 + (S_{\text{bobina}})^2} \quad (21)$$

Donde:

- n                    Es el número de vueltas de la bobina de corriente.  
S<sub>calibrador</sub>        Es la especificación del calibrador (normalmente hasta 20 A o 30 A).  
S<sub>bobina</sub>            Es la especificación debida a la interacción pinza y bobina con el calibrador.

Algunos fabricantes proporcionan estas especificaciones (espec.) indicando el nivel de confianza (por ejemplo, al 95% o 99%), en estos casos se supondrá una distribución normal dividiendo (espec.) por el valor de k (normalmente 2 o 3 según el nivel de confianza). Ver ecuación (22).

$$u(\delta I_{PME}) = \frac{\text{espec.}}{k} \quad (22)$$

Pero si el fabricante no proporciona estas especificaciones (espec.) indicando el nivel de confianza, para hallar la incertidumbre típica se supondrá una distribución rectangular dividiendo (espec.) por  $\sqrt{3}$ . Ver ecuación (23).

$$u(\delta I_{PME}) = \frac{\text{espec.}}{\sqrt{3}} \quad (23)$$

### Determinación de la incertidumbre típica combinada

La incertidumbre típica de  $y$ , siendo  $y$  la estimación del mensurando  $Y$ ; es decir, el resultado de medida, se obtiene componiendo adecuadamente las incertidumbres típicas de las estimaciones de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_N$ . Esta incertidumbre típica combinada de la estimación  $y$  se nota como  $u_c(y)$  y se obtiene a partir de la ecuación (16).

El desglose de la ecuación (16) para el modelo matemático en este procedimiento, estaría dada por la ecuación (24).

$$u_c(y) = \sqrt{u^2(I_M) + u^2(\delta I_M) + u^2(\delta I_{MT}) + u^2(\delta I_{PC}) + u^2(\delta I_{PME})} \quad (24)$$

### Cálculo de los grados efectivos de libertad

El número efectivo de grados de libertad  $v_{\text{eff}}$  se calcula a partir de la fórmula de Welch-Satterthwaite. Ver ecuación (25).

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (25)$$

Donde:

|                  |  |
|------------------|--|
| $v_{\text{eff}}$ | Grados efectivos de libertad de $u_c(y)$                     |
| $u_c(y)$         | Incertidumbre típica combinada                               |
| $u_i(y)$         | Componente de la incertidumbre típica combinada $u_c(y)$     |
| $v_i$            | Grados de libertad (G.L) de la incertidumbre típica $u(x_i)$ |

Desarrollando la ecuación (25) para las estimaciones de las magnitudes de entrada particulares consideradas en este procedimiento, quedaría la ecuación (26).

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\frac{u^4(I_M)}{v I_M} + \frac{u^4(\delta I_M)}{v \delta I_M} + \frac{u^4(\delta I_{MT})}{v \delta I_{MT}} + \frac{u^4(\delta I_{PME})}{v \delta I_{PME}} + \frac{u^4(\delta I_{PC})}{v \delta I_{PC}}} \quad (26)$$

Donde:

|                   |   |
|-------------------|---|
| $vI_M$            | G.L por variación de las lecturas de la pinza amperimétrica a calibrar. Para la magnitud estimada por la media aritmética de $m$ mediciones independientes, se asocia la incertidumbre típica tipo A con una distribución normal cuyo número de G.L $v$ es igual a $m - 1$ . (G.3.3 de la GUM).   |
| $v\delta I_M$     | G.L por resolución de la pinza amperimétrica a calibrar. Se asocia con una incertidumbre típica tipo B con una distribución rectangular cuyo número de G.L $v$ es infinito ( $\infty$ ). (G.4.3 de la GUM).   |
| $v\delta I_{MT}$  | G.L por la temperatura de funcionamiento de la pinza amperimétrica a calibrar. Se tiene completa seguridad que la calibración se realizó dentro del margen de temperatura de referencia del ítem de calibración, por ello se asocia a una incertidumbre típica tipo B con una distribución rectangular cuyo número de G.L $v$ es infinito ( $\infty$ ). (G.4.3 de la GUM).  |
| $v\delta I_{PME}$ | G.L por el valor de la señal aplicada con el calibrador debido a múltiples efectos. Debido a que las especificaciones del fabricante se conocen con exactitud. Se asocia a una incertidumbre típica tipo B con una distribución rectangular cuyo número de G.L $v$ es infinito ( $\infty$ ). (G.4.3 de la GUM).   |
| $v\delta I_{PC}$  | G.L por calibración del patrón. El certificado de calibración del patrón indica la incertidumbre expandida que a su vez está asociada directamente a un factor de cobertura $k$ con su correspondiente nivel de confianza $p$ . En este último caso se asocia a una incertidumbre típica tipo B con una distribución normal, cuyos G.L se deben deducir a partir de la distribución $t$ (tabla G.2 de la GUM). Ver anexo H. |

### **Determinación del factor de cobertura**

La elección del factor  $k$ , se fundamenta en la probabilidad o nivel de confianza requerido para el intervalo. Para obtener una mejor aproximación, es conveniente aplicar las recomendaciones dadas en el Anexo G de la GUM, cuyo factor  $k$  puede deducirse de  $k_p$  por medio de una distribución  $t$  (de Student) según el número efectivo de grados de libertad  $v_{eff}$  obtenido. Una vez determinado el valor de  $v_{eff}$ , se buscará el correspondiente factor de cobertura  $k$  en la tabla G.2 de la GUM para un nivel de confianza del 95,45%.

### Determinación de la incertidumbre expandida

Según el apartado 6.2.1 de la GUM, la incertidumbre expandida  $U$  se obtiene multiplicando la incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$  por un factor de cobertura  $k$ , como lo indica la ecuación (27)

$$U = k \times u_c(y) \quad (27)$$

### Balance de Componentes

La siguiente tabla muestra el presupuesto de incertidumbres para el resultado final, es decir, para la determinación de la incertidumbre de medición.

**Tabla 6**

*Balance de componentes.*

| Magnitud<br>(Fuente de<br>incertidumbre) | Valor<br>estimado<br>(A) | Incertidumbre<br>Típica<br>$u(x_i)$<br>(A)   | Coefficiente de<br>Sensibilidad<br>$c_i$ | Contribución a la<br>incertidumbre<br>$u_i(y) =  c_i  \times u(x_i)$<br>(A)        | Grados<br>de<br>Libertad<br>$\nu$ |
|--|--------------------------|--|--|--|-----------------------------------|
| $I_M$                                    | $\bar{I}_M$              | $\frac{\sqrt{\frac{1}{m-1} \times \sum_{i=1}^m (I_{Mi} - \bar{I}_M)^2}}{\sqrt{m}}$ | 1  | $\frac{\sqrt{\frac{1}{m-1} \times \sum_{i=1}^m (I_{Mi} - \bar{I}_M)^2}}{\sqrt{m}}$ | $n - 1$                           |
| $\delta I_M$                             | 0                        | $\frac{a}{2\sqrt{3}}$  | 1  | $\frac{a}{2\sqrt{3}}$  | $\infty$                          |
| $\delta I_{MT}$                          | 0                        | $\frac{C_{M0} \times \Delta T}{\sqrt{3}}$  | 1  | $\frac{C_{M0} \times \Delta T}{\sqrt{3}}$  | $\infty$                          |
| $\delta I_{PME}$                         | 0                        | $\frac{\text{espec.}}{\sqrt{3}}$   | -1                                       | $\frac{\text{espec.}}{\sqrt{3}}$   | $\infty$                          |
| $\delta I_{PC}$                          | $\delta I_{PC}$          | $\frac{U_P}{k}$  | $-n$                                     | $n \times \frac{U_P}{k}$   | $60^*$                            |
| $e_M$                                    |                          |  |  | $u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)}$  | $\nu_{\text{eff}}$                |

Nota. (\*) Se considera este valor como mínimo para un  $k$  menor a 2,05. Fuente: INACAL (2019).

### **3.2.2. *Elaboración y validación de hoja de cálculo***

#### **a) *Elaboración de hoja de cálculo***

Finalizado la elaboración del procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas, se elaboró una hoja en Excel que efectúa todos los cálculos de manera automática. El resultado final se presentará como el certificado de calibración de la pinza amperimétrica, toda la información que suministra dicho documento es clara y objetiva, cumpliendo con los requisitos del apartado 7.8 “Informe de resultados” de la Norma NTP ISO/IEC 17025:2017. Los resultados más relevantes que se presentan en dicho certificado son:

- La lectura del ítem de calibración para cada punto de calibración.
- La lectura del patrón para cada punto de calibración.
- El error de medición para cada punto de calibración.
- La incertidumbre expandida para cada punto de calibración.

La forma de expresar los resultados de la calibración sigue las recomendaciones dadas en el apartado 7.2.6 de la GUM, la cual indica que para la incertidumbre expandida  $U$  es suficiente con mostrar dos cifras significativas, aunque en ciertos casos, pueda ser necesario mantener cifras suplementarias para evitar la propagación de errores de redondeo en cálculos posteriores. En cuanto a la estimación de salida, es decir el error de medición, deberá redondearse de acuerdo con la cantidad de decimales que posee su incertidumbre. Esto también aplica para la lectura del patrón que se reportará.

La lectura del ítem de calibración se presenta con la cantidad de decimales que posee su resolución. Otro valor a reportar es el factor de cobertura  $k$  (siempre dos decimales) correspondiente a un nivel de confianza de aproximadamente el 95,45% para una distribución  $t$  (también llamada distribución de Student).

Si se realizaron ajustes de medida, también deberá constar en el certificado los valores de antes y después del ajuste. En caso de que el cliente solicite una declaración de conformidad (conociendo previamente las especificaciones y la regla de decisión), se deberá identificar en el certificado de calibración lo siguiente:

- a qué resultados se aplica la declaración de conformidad;
- qué especificaciones, normas o partes de ésta se cumplen o no;
- la regla de decisión aplicada (a menos que sea inherente a la especificación o norma solicitada).

Se debe aclarar en el certificado que los resultados informados se relacionan solamente con el ítem sometido a calibración y que se aplican bajo las condiciones especificadas. En el anexo G, se muestra un modelo de certificado de calibración de una pinza amperimétrica el cual cumple con la sistemática del procedimiento de calibración elaborado en el presente trabajo de investigación y la norma NTP ISO/IEC 17025:2017.

A continuación, se mostrará un ejemplo donde se detalla el contenido de la hoja de cálculo elaborado en base a todas las fórmulas e instrucciones mencionadas en el apartado 4.2.1 – Procedimiento de calibración. El punto de calibración que se analizará será 1000 A DC. Por ello se eligió la pinza amperimétrica de marca PEAK TEACH modelo 1670, debido a que tiene un rango de 1000,00 A con una resolución de 0,01 A.

El primer paso es definir en la columna Turn Coil el valor de 50 vueltas, luego se coloca el rango del IC, en este caso se coloca el valor de 1000 (se coloca sin unidades debido a que en la primera columna ya se define la unidad de corriente en Ampere -A). La columna de Valores referenciales indica el valor recomendado por el procedimiento de calibración, en este caso recomienda automáticamente un valor de 900 A, sin embargo, es posible calibrar la pinza hasta el valor máximo del rango del IC. En la columna de resolución se coloca el valor de 0,01 A debido a que este es el valor que se logra visualizar en el IC y además se menciona en el manual de fabricante. En la columna Valor aplicado al IC se escribe el valor nominal que se desea aplicar al IC, como se mencionó anteriormente se aplicará 1000 A, de manera automática se resalta la columna de Valor configurado del patrón de color naranja, ya que al setear el valor de 20,00 A en el calibrador y multiplicarlo por el número de vueltas de la bobina se obtendrá el valor de 1000 A. Ver figura 22.

## Figura 22

*Datos del IC y configuración del calibrador multifunción*

| Unidades | Número de vueltas de la Bobina | Rango | VALORES REFERENCIALES (10% , 30% , 50% , 70% , 90%) | Resolución del IC | Valor Aplicado al IC | Valor configurado del Patrón |
|----------|--------------------------------|-------|---|-------------------|----------------------|------------------------------|
|          | Turn Coil                      |       |   |                   |                      |                              |
| A        | 50                             | 1000  | 900   | 0,01              | 1000                 | 20,000                       |

El segundo paso es anotar las lecturas visualizadas en el IC, luego de aplicar el valor de corriente. Las anotaciones se hacen en las celdas correspondientes desde lectura 1 hasta lectura 5. Ver figura 23.

## Figura 23

*Lecturas del IC.*

| Lecturas del IC |           |           |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Lectura 1       | Lectura 2 | Lectura 3 | Lectura 4 | Lectura 5 |
| 998,12          | 998,13    | 998,13    | 998,13    | 998,14    |

Solamente en el primer y segundo paso se deben ingresar valores de manera manual, a partir del tercer paso, los cálculos se realizan de manera automática. En la figura 24, se muestra el valor promedio de las lecturas, los aportes de incertidumbre debido a múltiples efectos (estos se calculan en función de los valores de Scalibrador y Sbobina), incertidumbre de patrón (se calcula usando el certificado de calibración del calibrador multifunción). De manera adicional se calcula la corrección del patrón.

## Figura 24

*Cálculo del promedio, corrección, e incertidumbre por múltiples efectos y patrón.*

| Promedio    | Aporte de la señal aplicada del calibrador debido a múltiples efectos | Incertidumbre Patrón | Corrección Patrón | Scalibrador      | Sbobina      |
|-------------|---|----------------------|-------------------|------------------|--------------|
| $\bar{I}_M$ | espec.  | $U_p$                | $\delta I_{PC}$   | $S_{calibrador}$ | $S_{bobina}$ |
| 998,13      | 5,0573  | 0,001411             | -0,001590083      | 0,00835          | 5,04         |

En el cuarto paso se calculan las incertidumbres típicas, para el ítem y el patrón. Para el caso del ítem se considera la repetibilidad, resolución y factores ambientales. Para el caso del patrón se consideran las especificaciones e incertidumbre. Ver figura 25.

**Figura 25**

*Incertidumbres típicas.*

| INCERTIDUMBRES TÍPICAS, $u(x_i)$ |                |                 |                  |                 |
|----------------------------------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Ítem                             |                |                 | Patrón           |                 |
| Repetibilidad                    | Resolución     | Fact. Ambient.  | Especificaciones | Incertidumbre   |
| $u(IM)$                          | $u(\delta IM)$ | $u(\delta IMT)$ | $u(\delta IPME)$ | $u(\delta IPC)$ |
| 0,003162278                      | 0,002886751    | 0               | 2,919811995      | 0,000705558     |

En el quinto paso se calculan los coeficientes de sensibilidad correspondientes para cada incertidumbre típica. Ver figura 26.

**Figura 26**

*Coefficientes de sensibilidad.*

| COEFICIENTES DE SENSIBILIDAD, $c_i$ |                |                 |                  |                 |
|-------------------------------------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Ítem                                |                |                 | Patrón           |                 |
| Repetibilidad                       | Resolución     | Fact. Ambient.  | Especificaciones | Incertidumbre   |
| $u(IM)$                             | $u(\delta IM)$ | $u(\delta IMT)$ | $u(\delta IPME)$ | $u(\delta IPC)$ |
| 1                                   | 1              | 1               | -1               | -50             |

En el sexto paso se realiza la multiplicación del coeficiente de sensibilidad y la incertidumbre típica de cada aporte. Ver figura 27.

**Figura 27**

*Contribución a la incertidumbre.*

| CONTRIBUCIÓN A LA INCERTIDUMBRE, $u(y_i) =  c_i  \times u(x_i)$ |                |                 |                  |                 |
|---|----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Ítem  |                |                 | Patrón           |                 |
| Repetibilidad   | Resolución     | Fact. Ambient.  | Especificaciones | Incertidumbre   |
| $u(IM)$   | $u(\delta IM)$ | $u(\delta IMT)$ | $u(\delta IPME)$ | $u(\delta IPC)$ |
| 0,003162278   | 0,002886751    | 0               | 2,919811995      | 0,035277886     |

En el séptimo paso se calculan los grados de libertad por cada aporte de incertidumbre. Ver figura 28.

**Figura 28**

*Grados de libertad.*

| Grados de Libertad ( $\nu$ ) |                   |                      |                       |                      |
|------------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| Ítem                         |                   |                      | Patrón                |                      |
| Repetibilidad                | Resolución        | Fact. Ambient.       | Especificaciones      | Incertidumbre        |
| $\nu(I_M)$                   | $\nu(\delta I_M)$ | $\nu(\delta I_{MT})$ | $\nu(\delta I_{PME})$ | $\nu(\delta I_{PC})$ |
| 4                            | $\infty$          | $\infty$             | $\infty$              | 60                   |

En el octavo paso se calcula la incertidumbre combinada. Luego los grados efectivos de libertad, para posteriormente calcular el valor del factor de cobertura ( $k$ ), acto seguido se multiplica el valor de la incertidumbre combinada con el factor de cobertura, resultado la incertidumbre expandida. Ver figura 29.

**Figura 29**

*Incertidumbre combinada,  $\nu_{eff}$ ,  $k$ . Incertidumbre expandida.*

| Incertidumbre Combinada | Grados efectivos de libertad | Factor de Cobertura | Incertidumbre Expandida |
|-------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------|
| $U_c$                   | $\nu_{eff}$                  | $k$                 | $U$                     |
| 2,920028358             | 2813642637                   | 2,000               | 5,840056715             |

El último paso es verificar que los datos se encuentren correctamente ubicados en el formato del certificado de calibración, se debe considerar las cifras significativas y la resolución del IC para la presentación de los resultados. Ver figura 30.

**Figura 30**

*Presentación de resultados en certificado de calibración.*

| Función Corriente Continua |           |                     |            |          |            |               |                             |
|----------------------------|-----------|---------------------|------------|----------|------------|---------------|-----------------------------|
| Patrón                     |           | Ítem de Calibración |            |          | Resultados |               |                             |
| Aplicada                   | Corregida | Rango               | Resolución | Lectura  | Error      | Incertidumbre | Factor de cobertura ( $k$ ) |
| 1000,0 A                   | 999,9 A   | 1000,00 A           | 0,01 A     | 998,13 A | -1,8 A     | 5,8 A         | 2,00                        |

## **b) Validación de hoja de cálculo**

Según la cláusula 7.11.2 de la Norma NTP ISO/IEC 17025:2017, los sistemas de gestión de la información utilizados en el laboratorio para recopilar, procesar, informar, almacenar o recuperar datos se deben validar en cuanto a su funcionalidad, antes de ser introducidos en el laboratorio.

Para dar cumplimiento a ese requisito de la norma, se realizó la validación de la hoja de cálculo implementada para procesar de manera automática los datos ingresados durante el proceso de calibración. El objetivo de la validación es garantizar que la hoja de cálculo procesa correctamente los datos, cumpliendo con todas las especificaciones que exige el procedimiento de calibración.

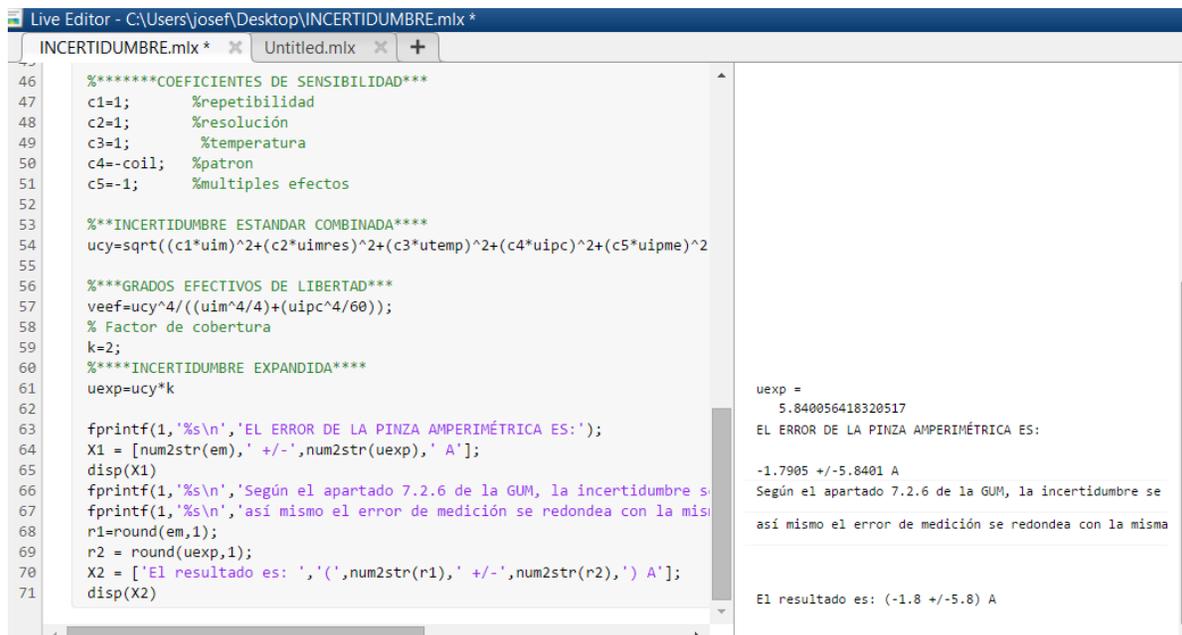
El método que el laboratorio de calibración utilizaba para validar las hojas de cálculos de cualquier procedimiento era de manera manual, es decir, que todo el proceso de los cálculos y fórmulas se escribían a mano, al finalizar la tarea, se comparaba que el resultado obtenido de manera manual era el mismo que entrega la hoja de cálculo. En el Anexo E se adjunta un ejemplo basado en el Anexo II del procedimiento PC-025 del INACAL, de cómo se validaba la hoja de cálculo de manera manual para un punto de calibración de 1000 A DC, utilizando una pinza amperimétrica con un rango de 1000 A en DC/AC y resolución de 0,01 A.

El método de validación manual utilizado, presentaba muchos problemas, uno de ellos era el tiempo que tomaba realizar los cálculos, la gran cantidad de errores que se cometían al realizar los cálculos, la constante repetición de los cálculos al cambiar otro punto de calibración, etc. Debido a estos problemas, decidí realizar una mejora para validar la hoja de cálculo usando un software de procesamiento de datos (MATLAB). La propuesta fue aceptada por la gerencia y actualmente el laboratorio de calibración realiza la validación de las hojas de cálculo con este software, reduciendo el tiempo de validación, los errores de cálculo, asegurando de esa forma que las fórmulas y cálculos son ejecutados de manera correcta.

En la figura 31, se muestra la ventana de trabajo del software Matlab donde se diseñó un programa que entrega como resultado el error e incertidumbre de medición de la pinza amperimétrica. El código fuente completo del programa se encuentra en el Anexo F, cabe resaltar que la programación se realizó en base a la misma pinza amperimétrica utilizada en la validación manual.

**Figura 31**

*Software Matlab utilizado para la validación de la hoja de cálculo.*



```
46 %*****COEFICIENTES DE SENSIBILIDAD***
47 c1=1; %repetibilidad
48 c2=1; %resolución
49 c3=1; %temperatura
50 c4=-coil; %patron
51 c5=-1; %multiples efectos
52
53 %**INCERTIDUMBRE ESTANDAR COMBINADA***
54 ucy=sqrt((c1*uim)^2+(c2*uimres)^2+(c3*utemp)^2+(c4*uipc)^2+(c5*uipe)^2
55
56 %***GRADOS EFECTIVOS DE LIBERTAD***
57 veef=ucy^4/((uim^4/4)+(uipc^4/60));
58 % Factor de cobertura
59 k=2;
60 %***INCERTIDUMBRE EXPANDIDA***
61 uexp=ucy*k
62
63 fprintf(1,'%s\n','EL ERROR DE LA PINZA AMPERIMÉTRICA ES:');
64 X1 = [num2str(em), ' +/-', num2str(uexp), ' A'];
65 disp(X1)
66 fprintf(1,'%s\n','Según el apartado 7.2.6 de la GUM, la incertidumbre s
67 fprintf(1,'%s\n','así mismo el error de medición se redondea con la mis
68 r1=round(em,1);
69 r2 = round(uexp,1);
70 X2 = ['El resultado es: ', '(' , num2str(r1), ' +/-', num2str(r2), ') A'];
71 disp(X2)
```

uexp =  
5.840056418320517  
EL ERROR DE LA PINZA AMPERIMÉTRICA ES:  
-1.7905 +/-5.8401 A  
Según el apartado 7.2.6 de la GUM, la incertidumbre se  
así mismo el error de medición se redondea con la misma  
El resultado es: (-1.8 +/-5.8) A

### 3.2.3. *Elaboración de la capacidad de medición y calibración (CMC)*

Según Morales (2018) existen unos principios básicos para elaborar una CMC.

- Los laboratorios acreditados deben estimar la incertidumbre expandida según la GUM (Guía para la Expresión de la Incertidumbre en la Medición) y sus suplementos.
- No debe haber ambigüedad en el alcance de medición ni en la incertidumbre de medición.
- Se puede expresar la incertidumbre mediante:
  - ✓ Un valor único, que sea válido en todo el alcance de medición.
  - ✓ Un rango. En este caso, el laboratorio debe indicar claramente cómo interpolar para hallar la incertidumbre para valores intermedios.
  - ✓ Una función del mensurando. Puede ser la ecuación de una recta o una curva.
  - ✓ Una matriz, donde las incertidumbres dependen del mensurando y de parámetros adicionales.
- No se permiten los intervalos abiertos en la expresión de incertidumbre.
- Las CMC se deben elaborar en base al “mejor instrumento de medición existente” para cada categoría seleccionada.

- Las constantes, los rangos o las funciones deben corresponder a valores iguales o mayores que las incertidumbres originales que se reportaron en una comparación o en un presupuesto de incertidumbre.

Teniendo en consideración los principios básicos mencionados, la presentación de la CMC para el laboratorio de calibración se realizó a través de una función, ecuación de la recta.

Para obtener la Capacidad de Medición y Calibración se seleccionó una base de datos históricos y manuales técnicos de los ítems de mejor desempeño que se habían calibrado en el laboratorio. En el apartado 3.3.2 - Resultados de la capacidad de medición y calibración (CMC) de este trabajo de investigación, se muestra los resultados obtenidos luego de estimar la incertidumbre de medición para distintos puntos de calibración en todos los rangos de medición de los ítems utilizados, en este caso la incertidumbre se expresó mediante un valor único.

Debajo de las tablas de resultados para cada rango de medición, se muestra la tabla con la ecuación de la recta, la cual tiene como objetivo hallar la CMC para un determinado intervalo de medición. Es muy importante tener en cuenta que el valor de la incertidumbre resultante de cualquier calibración realizada por el laboratorio, debe ser igual o mayor que las incertidumbres originales que se reportaron en la tabla de resultados de incertidumbres.

#### ***3.2.4. Verificación del método de calibración***

Según la cláusula 7.2.1.5 de la Norma NTP ISO/IEC 17025:2017, el laboratorio debe verificar que puede llevar a cabo apropiadamente los métodos antes de utilizarlos, asegurando que se pueda lograr el desempeño requerido. Para cumplir con ese requisito de la norma, se realizó la verificación del método de calibración a través de las pruebas de veracidad y precisión.

##### **3.2.4.1. Veracidad**

EURACHEM (2016) indica que veracidad de medición es una expresión de la proximidad de la media de un número infinito de resultados (producidos con el método) a un valor de referencia. Puesto que no es posible realizar un número infinito de mediciones, no se puede medir la veracidad. Sin embargo, podemos realizar una evaluación práctica de la

veracidad. Por lo general, esta evaluación se expresa cuantitativamente en términos de 'sesgo'. (p. 31)

El Comité Técnico de acreditación de laboratorios clínicos (2021) define a la veracidad como el grado de concordancia existente entre la media aritmética de un gran número de resultados y el valor verdadero o aceptado como referencia. Se relaciona con la presencia de errores de tipo sistemático, también llamado “sesgo” o “desviación”; que puede expresarse como un valor absoluto o relativo al valor verdadero. (p. 10).

### **Herramientas estadísticas para la evaluación de la veracidad**

En el presente trabajo de investigación se empleó el sesgo como medida cuantitativa de la veracidad. Por obtener el valor del sesgo se calculó la diferencia entre el valor promedio de las n mediciones realizadas por un técnico de referencia y el promedio de promedios de los p técnicos participantes. “Una diferencia sistemática importante en relación al valor de referencia aceptado se refleja en un mayor valor del sesgo, cuanto más pequeño es el sesgo, mayor veracidad indica el método” (Instituto de Salud Pública de Chile, 2010, p. 38).

Según EURACHEM (2016), “una determinación práctica del sesgo se basa en la comparación de la media de los resultados ( $\bar{x}$ ) del método candidato con un valor de referencia adecuado  $x_{ref}$ ” (p. 31). El sesgo puede expresarse según la ecuación (28).

$$b = \bar{x} - x_{ref} \quad (28)$$

### **Prueba t de Student**

El Instituto de Salud Pública de Chile (2010) efectúa la prueba t de student para evaluar el sesgo, determinando de esa forma si existen diferencias estadísticamente significativas entre el valor promedio del técnico de referencia y el promedio de los resultados obtenidos por lo p técnicos. Para realizar la prueba t de student es necesario hallar los valores del t experimental y el t crítico.

El t experimental se puede calcular utilizando la ecuación (29).

$$t_{\text{experimental}} = \frac{|V_{\text{promedio}} - V_{\text{referencia}}|}{s/\sqrt{n}} \quad (29)$$

Donde:

|                           |  |
|---------------------------|--|
| $t_{\text{experimental}}$ | t observado o calculado.                 |
| $V_{\text{referencia}}$   | Valor esperado                           |
| $V_{\text{promedio}}$     | Promedio de valores leídos u observados. |
| s                         | Desviación estándar                      |
| n                         | Número de lecturas o valores observados. |

El t crítico se halla por lo general usando una tabla t de Student, donde se intercepta el valor de los grados de libertad (n-1) y el nivel de significancia ( $\alpha=0.05$ ). Sin embargo, para este trabajo de investigación se utilizó la función de Excel que entrega de manera rápida y confiable, el inverso de dos colas de la distribución t de Student. Luego de obtener el t experimental y el t crítico se evaluará de la siguiente forma:

Si  $t_{\text{exp}} < t_{\text{crít}}$ , entonces se aceptará la hipótesis nula, concluyendo que las medias de los p grupos son todas iguales.

Si  $t_{\text{exp}} > t_{\text{crít}}$ , entonces se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que al menos una de las medias es diferente.

### **Formato de toma de datos**

En la figura 32 se muestra el formato elaborado para realizar la evaluación del sesgo, a través de la prueba t de student. En la tabla I. Se recopilan todos los datos obtenidos por todos los grupos participantes, para luego hallar el valor del sesgo (promedio de promedios – valor de referencia). En la tabla II. Finalmente se realiza la prueba t de student, donde se compara el valor del t experimental calculado contra el t crítico, de esta manera se acepta o rechaza la hipótesis nula.



Según el Instituto de Salud Pública de Chile (2010), “la precisión podrá establecerse en términos de repetibilidad y reproducibilidad. El grado de precisión se expresa habitualmente en términos de imprecisión y se calcula como desviación estándar de los resultados” (p. 42).

### **Herramientas estadísticas para la evaluación de la precisión**

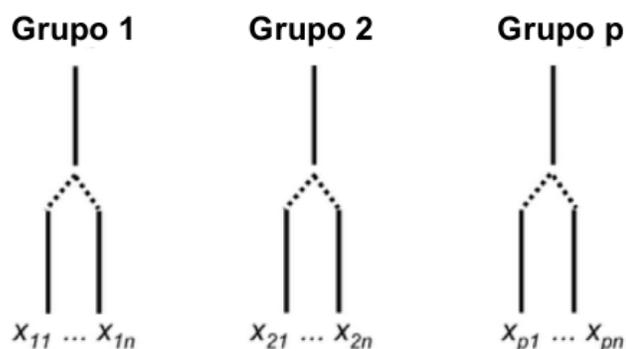
En el presente trabajo de investigación se empleó como herramienta estadística el análisis de varianza (ANOVA) para determinar de manera simultánea la repetibilidad y la precisión intermedia. La repetibilidad se calculó como la precisión de las n mediciones que realizó cada técnico y la precisión intermedia se calculó como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la precisión de cada técnico y entre técnicos.

### **Análisis de la varianza (ANOVA)**

EURACHEM (2016) indica que la idea central del ‘análisis de varianza’ (ANOVA) es que cuando se cuenta con en una serie de datos replicados, estos se pueden agrupar de una misma manera, p. ej., por analista, instrumento, día, laboratorio, método, etc., la variación total en la serie completa se puede representar como la combinación de las varianzas ( $s^2$ ) entre grupos y dentro de los grupos. Se puede usar ANOVA para evaluar los resultados a partir del tipo de estudio experimental mostrado en la figura 33. En este diseño anidado, se repiten las medidas replicadas (obtenidas generalmente en condiciones de repetibilidad) en series diferentes de medida para obtener p grupos de datos. Para estimar la precisión intermedia de dicho estudio debería existir la máxima variación en las condiciones en las que realizan las series (diferentes días, analistas, etc.). (p. 52)

**Figura 33**

*Diseño anidado.*



*Nota.* Experimento en el que se pueden evaluar distintas medidas de precisión utilizando ANOVA. Fuente: EURACHEM (2016).

EURACHEM (2016) explica a través de la tabla 7, la forma general del ANOVA de un factor, para un total de  $N$  resultados, distribuidos en  $p$  grupos de  $n$  observaciones y con  $v$  grados de libertad. Cada fila de la tabla hace referencia a una fuente de variación distinta. La primera fila (Entre grupos – Between) corresponde a la variación entre las medias de los grupos; la segunda fila (Dentro del grupo – Within) describe la variación dentro de los grupos y la tercera fila describe la variación del conjunto de los datos en su totalidad.

**Tabla 7**

*Estructura de una tabla ANOVA de un factor.*

| Análisis simple de la varianza |                         |                        |                     |             |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------|-------------|
| Fuentes de variación           | Sumas De cuadrados (SS) | Grados de libertad (v) | Cuadrado Medio (MS) | F           |
| Entre grupos (Between)         | $SS_e$                  | $v_e = p - 1$          | $MS_e = SS_e/v_e$   | $MS_e/MS_d$ |
| Dentro del grupo (Within)      | $SS_d$                  | $v_d = N - p$          | $MS_d = SS_d/v_d$   |             |
| Total                          | $SS_t = SS_e + SS_d$    | $v_t = N - 1$          |                     |             |

*Nota.* Elaboración propia en base a la tabla extraída de la Guía de Laboratorio para Validación de Métodos y Temas Relacionados. Fuente: EURACHEM (2016).

A continuación, se muestran las ecuaciones (30), (31), (32), para hallar los valores correspondientes a cada fila

$$SS_e = \frac{(\sum x_1)^2}{n_1} + \frac{(\sum x_2)^2}{n_2} + \frac{(\sum x_3)^2}{n_3} + \dots + \frac{(\sum x_i)^2}{n_i} - \frac{(\sum \sum x)^2}{N} \quad (30)$$

$$SS_d = SSt - SSe \quad (31)$$

$$SSt = \sum \sum x_i^2 - \frac{(\sum \sum x)^2}{N} \quad (32)$$

EURACHEM (2016) indica que si se cumplen las siguientes tres condiciones: El diseño anidado se realiza en un único laboratorio, las réplicas dentro de cada grupo se han obtenido en condiciones de repetibilidad y que las condiciones analíticas variaron entre grupos. Entonces los cálculos para hallar la repetibilidad y la precisión intermedia se realizan tal como se muestra a continuación:

- a) **La desviación estándar de la repetibilidad** igual a ( $s_d$ ), se obtiene calculando la raíz cuadrada del término del cuadrado medio dentro del grupo que representa la varianza intra-grupo. Ver ecuación (33).

$$S_{dentro-grupos} (S_d) = \sqrt{MS_d} \quad (33)$$

Los grados de libertad asociados con el cálculo de  $S_d$  es:  $N - p$

- b) **La contribución a la variación total del factor de agrupamiento** igual a ( $S_e$ ) también se obtiene a partir de la tabla ANOVA. Ver ecuación (34).

$$S_{entre-grupos} (S_e) = \sqrt{\frac{MS_e - MS_d}{n}} \quad (34)$$

Donde  $n$  es el número de resultados dentro de cada grupo

Los grados de libertad asociados con el cálculo de  $S_e$  es:  $p - 1$

c) **La precisión intermedia** igual a ( $S_t$ ) se obtiene combinando los componentes de la varianza intra-grupo y entre grupos. Ver ecuación (35).

$$S_t = \sqrt{S_e^2 + S_d^2} \quad (35)$$

### **Significancia estadística**

Al obtener los valores F, F crítico y P se podrá concluir si la variación entre resultados obtenidos en días diferentes es significativamente superior a la variación de los resultados obtenidos en un mismo día (EURACHEM, 2016). Se debe tener en cuenta que el valor F deberá ser menor al valor  $F_{\text{crítico}}$  (F de Fisher) de esa forma se concluye que no existe diferencia significativa entre los resultados. Ver ecuación (36).

$$F_{\text{calculado}} = \frac{MS_{\text{entre-grupos}}}{MS_{\text{dentro-grupos}}} \quad (36)$$

### **Cálculo de los coeficientes de variación**

Según El Comité Técnico de acreditación de laboratorios clínicos (2021), es posible calcular el coeficiente de variación en condiciones de repetibilidad (CVR) y el coeficiente de variación intralaboratorio (CVWL), tal como se muestra a continuación.

#### **a) Coeficiente de variación en condiciones de repetibilidad**

Luego de obtener la desviación estándar dentro de grupos ( $S_d$ ), se calcula el coeficiente de variación en condiciones de repetibilidad expresado en porcentaje. Ver ecuación (37).

$$\text{CVR \%} = \frac{S_d}{\bar{x}} \times 100 \quad (37)$$

Donde:

$\bar{x}$  Promedio de las N mediciones.

Este coeficiente también se le conoce como coeficiente de variación muestral ya que mide la dispersión relativa de los valores de un ítem en torno a la media muestral. Como no tiene unidades, es muy sencillo de interpretar: Cuanto mayor sea el coeficiente de variación, mayor será la dispersión y menos representativa será la media.

## **b) Coeficiente de variación en condiciones de precisión intralaboratorio**

Luego de obtener ( $S_t$ ) al combinar los componentes de la varianza intra-grupo y entre grupos, se calcula el coeficiente de variación en condiciones de precisión intralaboratorio expresado en porcentaje. Ver ecuación (38).

$$CVWL \% = \frac{S_t}{\bar{x}} \times 100 \quad (38)$$

Donde:

$\bar{x}$  Promedio de las N mediciones.

### **Criterio de aceptación**

El Ministerio de Salud Costa Rica (s.f.) menciona que existen distintos criterios de aceptación, sin embargo, de manera general para evaluar la precisión del sistema o del método, la repetibilidad y la precisión intermedia debe ser menor o igual al 2 %, y en algunos casos puede ser igual o menor del 3%. Para el presente trabajo de investigación se consideró el valor de 2% como criterio de aceptación para la repetibilidad y la precisión intermedia. Por lo tanto, para declarar si el método implementado es aceptado, tanto el coeficiente de variación en condiciones de Repetibilidad (CVR) y el coeficiente de variación en condiciones de precisión intermedia o también conocido como precisión intralaboratorio (CVWL) deben ser menores o iguales a 2%.

### **Formato de toma de datos**

En la figura 34 se muestra el formato elaborado para realizar la evaluación de la repetibilidad y precisión intralaboratorio. En la tabla I. Se recopilan todos los datos obtenidos por todos los grupos participantes. En la tabla II. Se realiza el cálculo de los cuadros medios entre grupos y dentro de los grupos. En la Tabla III. Se realiza la prueba de significancia estadística, para ello se emplea el F calculado y el F crítico, en base a esos resultados se podrá determinar si existen diferencias significativas entre grupos. En las tablas IV y V. Se realiza el cálculo de las varianzas dentro de los grupos y entre grupos para para lograr hallar el desvío estándar en condiciones de repetibilidad y precisión intralaboratorio. En la tabla VI. Se calculan los coeficientes de variación en condiciones de repetibilidad y precisión intralaboratorio. Finalmente, si los coeficientes de variación son menores al declarado por el laboratorio, se ha

verificado la precisión en condiciones de repetibilidad y/o precisión intralaboratorio desde el punto de vista estadístico.

**Figura 34**

*Formato en Excel para evaluación de repetibilidad y precisión intralaboratorio.*

| VERIFICACIÓN DEL MÉTODO  |                                 |                                   |                             |          | N°:               |
|--|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------|-------------------|
| HOJA DE CÁLCULO ANOVA  |                                 |                                   |                             |          | Área: CALIBRACIÓN |
| <b>Evaluación de repetibilidad y precisión intralaboratorio</b>  |                                 |                                   |                             |          |                   |
| Ítem:  |                                 |                                   |                             |          |                   |
| <b>Tabla I. Resultados experimentales</b>  |                                 |                                   |                             |          |                   |
| Pruebas  | Resultados en Grupos (Técnicos) |                                   |                             |          |                   |
|  | T1                              | T2                                | T3                          | T4       | T5                |
| Test 1   |                                 |                                   |                             |          |                   |
| Test 2   |                                 |                                   |                             |          |                   |
| Test 3   |                                 |                                   |                             |          |                   |
| n = 0  |                                 |                                   | $\rho =$ # grupos           |          | media             |
| p = 0  |                                 |                                   | N = # de datos              |          | #iDIV/0!          |
| N = 0  |                                 |                                   |                             |          |                   |
| <b>Tabla II. Cálculo de los cuadrados medios entre-grupos y dentro-grupos</b>  |                                 |                                   |                             |          |                   |
| Fuente de variación  | Suma de cuadrados (SS)          | Grados de Libertad (v)            | Cuadrados medios (MS)       |          |                   |
| Entre-grupos (B)   | S <sub>se</sub> = #iDIV/0!      | -ve = 1                           | M <sub>Se</sub> = #iDIV/0!  |          |                   |
| Dentro-grupos (W)  | S <sub>Sd</sub> = #iDIV/0!      | vd = 0                            | M <sub>Sd</sub> = #iDIV/0!  |          |                   |
| Total (T)  | S <sub>St</sub> = #iDIV/0!      | -vt = 1                           |                             |          |                   |
| <b>Tabla III. Prueba de significancia estadística</b>  |                                 |                                   |                             |          |                   |
| F=M <sub>Se</sub> /M <sub>Sd</sub>   | F <sub>0.05</sub>               | P-value                           | Significancia Estadística?  |          |                   |
| F <sub>calculado</sub>   | F <sub>critico</sub>            | $\alpha = 0.05$                   |                             |          |                   |
| #iDIV/0!   | #iNUM!                          | #iDIV/0!                          | #iDIV/0!                    |          |                   |
| Los valores F <sub>calculado</sub> , F <sub>crítico</sub> y P permitirán extraer conclusiones sobre si hay una diferencia estadísticamente significativa entre-grupos. Para esto, se usa la prueba-F. Siendo $\alpha$ , $s_e$ y $s_t$ las desviaciones estándares dentro-grupos, entre-grupos y total respectivamente. |                                 |                                   |                             |          |                   |
| #iDIV/0!   |                                 |                                   |                             |          |                   |
| <b>Tabla IV. Cálculo de las varianzas dentro de los grupos (S<sup>2</sup><sub>d</sub>) y entre grupos (S<sup>2</sup><sub>e</sub>)</b>  |                                 |                                   |                             |          |                   |
| $s_d^2 = MS_d$   | $s_t^2 = s_e^2 + s_d^2$         |                                   | $s_e^2 = (MS_e - MS_d) / n$ |          |                   |
| Nota: Si el resultado de $s_e^2$ es negativo, se le asignará el valor de cero.   |                                 |                                   |                             |          |                   |
| S <sup>2</sup> <sub>d</sub>  | S <sup>2</sup> <sub>e</sub>     | S <sup>2</sup> <sub>t</sub>       | S <sup>2</sup> <sub>e</sub> | #iDIV/0! |                   |
| #iDIV/0!   | #iDIV/0!                        | #iDIV/0!                          |                             |          |                   |
| <b>Tabla V. Desvío estándar en condiciones de repetibilidad (S<sub>d</sub>) y precisión intralaboratorio (S<sub>t</sub>)</b>   |                                 |                                   |                             |          |                   |
| S <sub>d</sub>   | S <sub>e</sub>                  | S <sub>t</sub>                    |                             |          |                   |
| #iDIV/0!   | #iDIV/0!                        | #iDIV/0!                          |                             |          |                   |
| <b>Tabla VI. Cálculo de coeficientes de variación en condiciones de repetibilidad (CVR) y precisión intralaboratorio (CVWL)</b>  |                                 |                                   |                             |          |                   |
| CVR=(S <sub>d</sub> /media) x100   |                                 | CVWL=(S <sub>t</sub> /media) x100 |                             |          |                   |
| CVR  | CVWL                            | Criterio de Aceptación            |                             | 2.0%     |                   |
| #iDIV/0!   | #iDIV/0!                        |                                   |                             |          |                   |

### ***3.2.5. Evaluación del desempeño del laboratorio***

Según CASCO (2010) a través de las comparaciones interlaboratorios se puede evaluar el desempeño individual de los laboratorios para llevar a cabo ensayos o mediciones específicas. El propósito es identificar algunos problemas tales como: procedimientos de medición inadecuados, mala supervisión del personal, equipamiento sin trazabilidad metrológica, etc. para luego iniciar acciones correctivas que permitan el seguimiento continuo del laboratorio. Además, permite comparar el desempeño del laboratorio frente a otros laboratorios, valida las estimaciones de incertidumbre declaradas y proporciona confiabilidad adicional a los clientes del laboratorio en la emisión de los resultados.

Según el Comité técnico del INACAL (2020) la idoneidad de los proveedores de ensayos de aptitud/ comparación interlaboratorios serán juzgados con base al cumplimiento de alguno de los siguientes criterios:

- a) Que sean organismos de acreditación signatarios de MLA de IAAC o MRA de APAC o ILAC.
- b) Que estén incluidos como proveedores de pruebas de aptitud en la European Proficiency Testing System (EPTIS).
- c) Que hayan sido acreditados con la Norma ISO/IEC 17043 ó que demuestren que cumplen con esta norma.
- d) Que sea un Instituto Nacional de Metrología.

Para el caso del laboratorio materia de investigación, la evaluación del desempeño se realizó con el laboratorio de electricidad de la Dirección de Metrología del INACAL, el cual organizó la evaluación de desempeño DMLE-07 “Comparación de Pinzas Amperimétricas” actuando como laboratorio piloto y coordinador. Cabe resaltar que en la página web del INACAL se actualiza una lista con las posibles fechas para participar en las intercomparaciones, ante esa oportunidad, se realizó todo el proceso para que el laboratorio de calibración logre participar. En la tabla 8, se puede evidenciar la lista de laboratorios participantes.

**Tabla 8***Lista de laboratorios participantes.*

| Número                               | Laboratorio participante | Fecha de recojo | Fecha de devolución | Fecha de entrega de resultados |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------------|
| INICIO DE LA COMPARACIÓN: 2018-07-23 |                          |                 |                     |                                |
| 1                                    | UNIMETRO                 | 2018-07-30      | 2018-08-02          | 2018-08-08                     |
| 2                                    | INSPERSAC                | 2018-08-06      | 2018-08-09          | 2018-08-15                     |
| 3                                    | PROMEAL                  | 2018-08-13      | 2018-08-16          | 2018-08-22                     |
| 4                                    | METROIL                  | 2018-08-20      | 2018-08-23          | 2018-08-29                     |
| 5                                    | RELES                    | 2018-09-03      | 2018-09-06          | 2018-09-12                     |
| 6                                    | INMETRO                  | 2018-09-10      | 2018-09-13          | 2018-09-19                     |
| 7                                    | ICM                      | 2018-09-17      | 2018-09-20          | 2018-09-26                     |
| 8                                    | ELICROM                  | 2018-09-24      | 2018-09-27          | 2018-10-03                     |
| 9                                    | LO JUSTO                 | 2018-10-01      | 2018-10-05          | 2018-10-11                     |
| FIN DE LA COMPARACIÓN: 2018-10-12    |                          |                 |                     |                                |

*Nota.* Elaboración propia en base a la gráfica extraída del informe final de la evaluación de desempeño DM-LE-07. Fuente: Laboratorio de electricidad de la dirección de metrología del INACAL (2018).

Para el desarrollo de la comparación interlaboratorios, el laboratorio de electricidad de la Dirección de Metrología del INACAL, distribuyó una pinza amperimétrica digital de 4199 cuentas, con capacidad de medición en corriente alterna desde los 4 A hasta 1000 A y con una exactitud de  $\pm 1,5\%$  en lectura  $\pm 5$  dígitos. Ver figura 35.

Se resalta que fue responsabilidad de cada laboratorio participante recoger la pinza amperimétrica del laboratorio piloto y devolverlo al laboratorio piloto en las fechas acordadas, en el cronograma correspondiente.

**Figura 35**

*Pinza amperimétrica: marca HIOKI, modelo 3280-20, serie 121212249.*



La magnitud a determinar fue corriente alterna. Cada participante siguió el procedimiento de calibración que tiene particularmente establecido, utilizando los medios para obtener su mejor capacidad de medición para la calibración de una pinza amperimétrica. Las mediciones se realizaron de acuerdo a la tabla 9.

**Tabla 9**

*Valores de medición en la comparación.*

| <b>FUNCIÓN</b> | <b>FRECUENCIA</b> | <b>VALOR</b> |
|----------------|-------------------|--------------|
| CORRIENTE      | 60 Hz             | 37,8 A       |
|                | 60 Hz             | 378 A        |
|                | 60 Hz             | 900 A        |

*Nota.* Elaboración propia en base a la tabla extraída del informe final de la evaluación de desempeño DM-LE-07. Fuente: Laboratorio de electricidad de la dirección de metrología del INACAL (2018).

### **Evaluación del Error Normalizado ( $E_n$ )**

El error normalizado consiste en comparar la diferencia entre el resultado obtenido por el laboratorio participante y el resultado de medición obtenido por el laboratorio de referencia, contra la suma cuadrática de las incertidumbres expandida de ambos valores.

Según CASCO (2010), el error normalizado ( $E_n$ ), se calcula utilizando la ecuación (39).

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (39)$$

Donde:

$E_n$  Error Normalizado.

$x$  Resultado de medición obtenido por el laboratorio participante.

$X$  Resultado de medición obtenido por la DM-INACAL.

$U_{lab}$  Estimación de la incertidumbre expandida de medición del laboratorio participante.

$U_{ref}$  Estimación de la incertidumbre expandida de medición de la DM-INACAL.

El criterio de error normalizado determina el desempeño de acuerdo a los valores obtenidos donde:

$|E_n| \leq 1,0$  DESEMPEÑO SATISFACTORIO.

$|E_n| > 1,0$  DESEMPEÑO INSATISFACTORIO.

Según CASCO (2010) el valor  $D$  (Diferencia o Estimación del sesgo del laboratorio) se calcula utilizando la ecuación (40). La diferencia  $D$  permite medir la desviación de cada laboratorio participante respecto al valor de referencia proporcionado.

$$D = x - X \quad (40)$$

Donde:

- x Resultado de medición obtenido por el laboratorio participante.
- X Valor de referencia dado por INACAL.
- D Sesgo.

### Formato de toma de datos

En el presente trabajo de investigación se calculó el valor del error normalizado empleando los valores de medición reportados por el laboratorio y los valores de referencia proporcionados por la DM-INACAL.

En la figura 36 se muestra el formato elaborado para realizar la evaluación del error normalizado.

### Figura 36

*Formato en Excel para evaluación del error normalizado.*

| LABORATORIO   | Error | U<br>(k=2,00) | EN | ¿Satisfactorio? |
|---------------|-------|---------------|----|-----------------|
|               | A     | A             |    |                 |
| <b>INACAL</b> |       |               |    |                 |
| LAB1          |       |               |    |                 |
| LAB2          |       |               |    |                 |
| LAB3          |       |               |    |                 |
| LAB4          |       |               |    |                 |
| LAB5          |       |               |    |                 |
| LAB6          |       |               |    |                 |
| LAB7          |       |               |    |                 |
| LAB8          |       |               |    |                 |
| <b>LAB9</b>   |       |               |    |                 |

### 3.3. Resultados

#### 3.3.1. Validación de hoja de cálculo

**Figura 37**

*Resultados para mediciones de corriente alterna en la hoja de cálculo.*

| Función Corriente Alterna |           |                     |            |          |            |               |                         |
|---------------------------|-----------|---------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------|
| Patrón                    |           | Ítem de Calibración |            |          | Resultados |               |                         |
| Aplicada                  | Corregida | Rango               | Resolución | Lectura  | Error      | Incertidumbre | Factor de cobertura (k) |
| 200,00 A                  | 199,93 A  | 1000,0 A            | 0,01 A     | 199,73 A | -0,20 A    | 0,74 A        | 2,00                    |
| 500,00 A                  | 499,84 A  |                     | 0,01 A     | 499,85 A | 0,0 A      | 1,7 A         | 2,00                    |
| 1000,00 A                 | 999,70 A  |                     | 0,01 A     | 999,68 A | 0,0 A      | 3,3 A         | 2,00                    |

**Figura 38**

*Resultados para mediciones de corriente alterna en el software Matlab.*

EL ERROR DE LA PINZA AMPERIMÉTRICA ES:

-0.202 +/-0.74433 A

EL ERROR DE LA PINZA AMPERIMÉTRICA ES:

0.002 +/-1.6957 A

EL ERROR DE LA PINZA AMPERIMÉTRICA ES:

-0.028 +/-3.2853 A

**Figura 39**

*Resultados para mediciones de corriente continua en la hoja de cálculo.*

| Función Corriente Continua |           |                     |            |          |            |               |                         |
|----------------------------|-----------|---------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------|
| Patrón                     |           | Ítem de Calibración |            |          | Resultados |               |                         |
| Aplicada                   | Corregida | Rango               | Resolución | Lectura  | Error      | Incertidumbre | Factor de cobertura (k) |
| 200,0 A                    | 200,0 A   | 1000,00 A           | 0,01 A     | 199,96 A | 0,0 A      | 1,6 A         | 2,00                    |
| 500,0 A                    | 500,0 A   | 1000,00 A           | 0,01 A     | 498,75 A | -1,2 A     | 3,2 A         | 2,00                    |
| 1000,0 A                   | 999,9 A   | 1000,00 A           | 0,01 A     | 998,13 A | -1,8 A     | 5,8 A         | 2,00                    |

**Figura 40**

*Resultados para mediciones de corriente continua en el software Matlab.*

EL ERROR DE LA PINZA AMPERIMÉTRICA ES:

-0.037135 +/-1.5745 A

EL ERROR DE LA PINZA AMPERIMÉTRICA ES:

-1.219 +/-3.174 A

EL ERROR DE LA PINZA AMPERIMÉTRICA ES:

-1.7905 +/-5.8401 A

### 3.3.2. Resultados de la Capacidad de medición y calibración (CMC)

**Tabla 10**

Resultados para rango de medición de 3 mA a 20 A en AC.

| Función Corriente Alterna |            |                     |            |          |            |               |                         |
|---------------------------|------------|---------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------|
| Patrón                    |            | Ítem de Calibración |            |          | Resultados |               |                         |
| Aplicada                  | Corregida  | Rango               | Resolución | Lectura  | Error      | Incertidumbre | Factor de cobertura (k) |
| 3,0000 mA                 | 3,0002 mA  | 30,00 mA            | 0,01 mA    | 3,00 mA  | -0,0002 mA | 0,0094 mA     | 2,02                    |
| 9,000 mA                  | 8,999 mA   |                     | 0,01 mA    | 9,00 mA  | 0,001 mA   | 0,010 mA      | 2,02                    |
| 15,000 mA                 | 14,997 mA  |                     | 0,01 mA    | 15,00 mA | 0,003 mA   | 0,011 mA      | 2,02                    |
| 21,000 mA                 | 20,995 mA  |                     | 0,01 mA    | 21,00 mA | 0,005 mA   | 0,013 mA      | 2,02                    |
| 30,000 mA                 | 29,992 mA  |                     | 0,01 mA    | 30,00 mA | 0,008 mA   | 0,015 mA      | 2,01                    |
| 30,000 mA                 | 29,992 mA  | 300,0 mA            | 0,1 mA     | 30,0 mA  | 0,008 mA   | 0,059 mA      | 2,00                    |
| 90,000 mA                 | 89,972 mA  |                     | 0,1 mA     | 90,0 mA  | 0,028 mA   | 0,069 mA      | 2,00                    |
| 120,000 mA                | 119,962 mA |                     | 0,1 mA     | 120,0 mA | 0,038 mA   | 0,077 mA      | 2,00                    |
| 210,00 mA                 | 209,93 mA  |                     | 0,1 mA     | 210,0 mA | 0,07 mA    | 0,11 mA       | 2,00                    |
| 300,00 mA                 | 299,90 mA  |                     | 0,1 mA     | 300,0 mA | 0,10 mA    | 0,14 mA       | 2,00                    |
| 0,3000 A                  | 0,2999 A   | 3,000 A             | 0,001 A    | 0,300 A  | 0,0001 A   | 0,0010 A      | 2,00                    |
| 1,0000 A                  | 0,9996 A   |                     | 0,001 A    | 1,000 A  | 0,0004 A   | 0,0017 A      | 2,00                    |
| 1,5000 A                  | 1,4994 A   |                     | 0,001 A    | 1,500 A  | 0,0006 A   | 0,0022 A      | 2,00                    |
| 2,1000 A                  | 2,0991 A   |                     | 0,001 A    | 2,100 A  | 0,0009 A   | 0,0047 A      | 2,00                    |
| 3,0000 A                  | 2,9988 A   |                     | 0,001 A    | 3,000 A  | 0,0012 A   | 0,0056 A      | 2,00                    |
| 3,0000 A                  | 2,9988 A   | 30,00 A             | 0,01 A     | 3,00 A   | 0,0012 A   | 0,0080 A      | 2,00                    |
| 9,000 A                   | 8,997 A    |                     | 0,01 A     | 9,00 A   | 0,003 A    | 0,013 A       | 2,00                    |
| 15,000 A                  | 14,995 A   |                     | 0,01 A     | 15,00 A  | 0,005 A    | 0,020 A       | 2,00                    |
| 18,000 A                  | 17,995 A   |                     | 0,01 A     | 18,00 A  | 0,005 A    | 0,023 A       | 2,00                    |
| 20,000 A                  | 19,994 A   |                     | 0,01 A     | 20,00 A  | 0,006 A    | 0,025 A       | 2,00                    |

Nota. La pinza amperimétrica utilizada es de la marca Fluke modelo 368.

**Tabla 11**

Ecuación para rangos de medición de 3 mA a 20 A en AC.

| Ecuación para la Función Corriente Alterna |             |                       |
|--|-------------|-----------------------|
| Pendiente                                  | Incepto     | Intervalo de Medición |
| 0,13 mA/A                                  | 8,9 $\mu$ A | (3 a 15) mA           |
| 0,26 mA/A                                  | 7,2 $\mu$ A | (15 a 30) mA          |
| 0,20 mA/A                                  | 53 $\mu$ A  | (30 a 120) mA         |
| 0,35 mA/A                                  | 36 $\mu$ A  | (120 a 300) mA        |
| 1,0 mA/A                                   | 0,67 mA     | (0,3 a 1,5) A         |
| 4,2 mA/A                                   | -4,1 mA     | (1,5 a 2,1) A         |
| 1,0 mA/A                                   | 2,6 mA      | (2,1 a 3,0) A         |
| 1,0 mA/A                                   | 4,5 mA      | (3 a 20) A            |

**Tabla 12***Resultados para rango de medición de 20 A a 500 A en AC.*

| Función Corriente Alterna |           |                     |            |          |            |               |                         |
|---------------------------|-----------|---------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------|
| Patrón                    |           | Ítem de Calibración |            |          | Resultados |               |                         |
| Aplicada                  | Corregida | Rango               | Resolución | Lectura  | Error      | Incertidumbre | Factor de cobertura (k) |
| 20,00 A                   | 19,99 A   | 50,00 A             | 0,01 A     | 20,00 A  | 0,01 A     | 0,14 A        | 2,00                    |
| 25,00 A                   | 24,99 A   |                     | 0,01 A     | 25,00 A  | 0,01 A     | 0,15 A        | 2,00                    |
| 30,00 A                   | 29,99 A   |                     | 0,01 A     | 30,00 A  | 0,01 A     | 0,17 A        | 2,00                    |
| 35,00 A                   | 34,99 A   |                     | 0,01 A     | 35,00 A  | 0,01 A     | 0,18 A        | 2,00                    |
| 45,00 A                   | 44,98 A   |                     | 0,01 A     | 45,00 A  | 0,02 A     | 0,22 A        | 2,00                    |
| 50,00 A                   | 49,98 A   | 1000,00 A           | 0,01 A     | 50,00 A  | 0,02 A     | 0,23 A        | 2,00                    |
| 60,00 A                   | 59,98 A   |                     | 0,01 A     | 60,00 A  | 0,02 A     | 0,26 A        | 2,00                    |
| 70,00 A                   | 69,97 A   |                     | 0,01 A     | 70,00 A  | 0,03 A     | 0,30 A        | 2,00                    |
| 80,00 A                   | 79,97 A   |                     | 0,01 A     | 80,00 A  | 0,03 A     | 0,33 A        | 2,00                    |
| 90,00 A                   | 89,96 A   |                     | 0,01 A     | 90,00 A  | 0,04 A     | 0,36 A        | 2,00                    |
| 100,00 A                  | 99,96 A   | 1000,00 A           | 0,01 A     | 100,00 A | 0,04 A     | 0,43 A        | 2,00                    |
| 200,00 A                  | 199,93 A  |                     | 0,01 A     | 200,00 A | 0,07 A     | 0,74 A        | 2,00                    |
| 300,0 A                   | 299,9 A   |                     | 0,01 A     | 300,00 A | 0,1 A      | 1,1 A         | 2,00                    |
| 400,0 A                   | 399,9 A   |                     | 0,01 A     | 400,00 A | 0,1 A      | 1,4 A         | 2,00                    |
| 500,0 A                   | 499,8 A   |                     | 0,01 A     | 500,00 A | 0,2 A      | 1,7 A         | 2,00                    |

*Nota.* La pinza amperimétrica utilizada es de la marca Peak Teach modelo P1670.**Tabla 13***Ecuación para rangos de medición de 20 A a 500 A en AC.*

| Ecuación para la Función Corriente Alterna |       | Intervalo de Medición |
|--|-------|-----------------------|
| 3,2 mA/A                                   | 72 mA | (20 a 90) A           |
| 3,3 mA/A                                   | 93 mA | (90 a 500) A          |

**Tabla 14***Resultados para rango de medición de 500 A a 1000 A en AC.*

| Función Corriente Alterna |           |                     |            |           |            |               |                         |
|---------------------------|-----------|---------------------|------------|-----------|------------|---------------|-------------------------|
| Patrón                    |           | Ítem de Calibración |            |           | Resultados |               |                         |
| Aplicada                  | Corregida | Rango               | Resolución | Lectura   | Error      | Incertidumbre | Factor de cobertura (k) |
| 500,0 A                   | 499,8 A   | 1000,00 A           | 0,01 A     | 500,00 A  | 0,2 A      | 1,7 A         | 2,00                    |
| 600,0 A                   | 599,8 A   |                     | 0,01 A     | 600,00 A  | 0,2 A      | 2,0 A         | 2,00                    |
| 650,0 A                   | 649,8 A   |                     | 0,01 A     | 650,00 A  | 0,2 A      | 2,2 A         | 2,00                    |
| 700,0 A                   | 699,8 A   |                     | 0,01 A     | 700,00 A  | 0,2 A      | 2,3 A         | 2,00                    |
| 750,0 A                   | 749,8 A   |                     | 0,01 A     | 750,00 A  | 0,2 A      | 2,5 A         | 2,00                    |
| 800,0 A                   | 799,8 A   | 1000,0 A            | 0,01 A     | 800,00 A  | 0,2 A      | 2,6 A         | 2,00                    |
| 850,0 A                   | 849,7 A   |                     | 0,01 A     | 850,00 A  | 0,3 A      | 2,8 A         | 2,00                    |
| 900,0 A                   | 899,7 A   |                     | 0,01 A     | 900,00 A  | 0,3 A      | 3,0 A         | 2,00                    |
| 950,0 A                   | 949,7 A   |                     | 0,01 A     | 950,00 A  | 0,3 A      | 3,1 A         | 2,00                    |
| 1000,0 A                  | 999,7 A   |                     | 0,01 A     | 1000,00 A | 0,3 A      | 3,3 A         | 2,00                    |

*Nota.* La pinza amperimétrica utilizada es de la marca Peak Teach modelo P1670.

**Tabla 15***Ecuación para rangos de medición de 500 A a 1000 A en AC.*

| Ecuación para la Función Corriente Alterna |        | Intervalo de Medición |
|--|--------|-----------------------|
| 3,2 mA/A                                   | 100 mA | (500 a 1000) A        |

**Tabla 16***Resultados para rango de medición de 2,1 mA a 100 mA en DC.*

| Función Corriente Continua |            |                     |            |          |            |               |                         |
|----------------------------|------------|---------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------|
| Patrón                     |            | Ítem de Calibración |            |          | Resultados |               |                         |
| Aplicada                   | Corregida  | Rango               | Resolución | Lectura  | Error      | Incertidumbre | Factor de cobertura (k) |
| 2,1000 mA                  | 2,0978 mA  | 21,00 mA            | 0,01 mA    | 2,10 mA  | 0,0022 mA  | 0,0058 mA     | 2,00                    |
| 6,3000 mA                  | 6,2978 mA  |                     | 0,01 mA    | 6,30 mA  | 0,0022 mA  | 0,0058 mA     | 2,00                    |
| 10,5000 mA                 | 10,4978 mA |                     | 0,01 mA    | 10,50 mA | 0,0022 mA  | 0,0058 mA     | 2,00                    |
| 14,7000 mA                 | 14,6977 mA |                     | 0,01 mA    | 14,70 mA | 0,0023 mA  | 0,0058 mA     | 2,00                    |
| 20,9900 mA                 | 20,9877 mA |                     | 0,01 mA    | 20,99 mA | 0,0023 mA  | 0,0058 mA     | 2,00                    |
| 21,000 mA                  | 20,998 mA  | 100,0 mA            | 0,1 mA     | 21,0 mA  | 0,002 mA   | 0,058 mA      | 2,00                    |
| 30,000 mA                  | 29,998 mA  |                     | 0,1 mA     | 30,0 mA  | 0,002 mA   | 0,058 mA      | 2,00                    |
| 50,000 mA                  | 49,997 mA  |                     | 0,1 mA     | 50,0 mA  | 0,003 mA   | 0,058 mA      | 2,00                    |
| 70,000 mA                  | 69,997 mA  |                     | 0,1 mA     | 70,0 mA  | 0,003 mA   | 0,058 mA      | 2,00                    |
| 100,000 mA                 | 99,997 mA  |                     | 0,1 mA     | 100,0 mA | 0,003 mA   | 0,058 mA      | 2,00                    |

*Nota.* La pinza amperimétrica utilizada es de la marca Fluke modelo 772.

**Tabla 17***Ecuación para rangos de medición de 2,1 mA a 100 mA en DC.*

| Ecuación para la Función Corriente Continua |           | Intervalo de Medición |
|---|-----------|-----------------------|
| 0,0 mA/A                                    | 0,0058 mA | (2,1 a 20,99) mA      |
| 0,0 mA/A                                    | 0,058 mA  | (21 a 100) mA         |

**Tabla 18***Resultados para rango de medición de 1 A a 200 A en DC.*

| Función Corriente Continua |           |                     |            |          |            |               |                         |
|----------------------------|-----------|---------------------|------------|----------|------------|---------------|-------------------------|
| Patrón                     |           | Ítem de Calibración |            |          | Resultados |               |                         |
| Aplicada                   | Corregida | Rango               | Resolución | Lectura  | Error      | Incertidumbre | Factor de cobertura (k) |
| 1,0000 A                   | 1,0000 A  | 50,00 A             | 0,01 A     | 1,00 A   | 0,0000 A   | 0,0058 A      | 2,00                    |
| 4,0000 A                   | 3,9999 A  |                     | 0,01 A     | 4,00 A   | 0,0001 A   | 0,0058 A      | 2,00                    |
| 10,0000 A                  | 9,9994 A  |                     | 0,01 A     | 10,00 A  | 0,0006 A   | 0,0059 A      | 2,00                    |
| 15,0000 A                  | 14,9987 A |                     | 0,01 A     | 15,00 A  | 0,0013 A   | 0,0060 A      | 2,00                    |
| 20,0000 A                  | 19,9984 A |                     | 0,01 A     | 20,00 A  | 0,0016 A   | 0,0062 A      | 2,00                    |
| 20,00 A                    | 20,00 A   | 50,00 A             | 0,01 A     | 20,00 A  | 0,00 A     | 0,29 A        | 2,00                    |
| 21,00 A                    | 21,00 A   |                     | 0,01 A     | 21,00 A  | 0,00 A     | 0,30 A        | 2,00                    |
| 25,00 A                    | 25,00 A   |                     | 0,01 A     | 25,00 A  | 0,00 A     | 0,32 A        | 2,00                    |
| 28,00 A                    | 28,00 A   |                     | 0,01 A     | 28,00 A  | 0,00 A     | 0,34 A        | 2,00                    |
| 30,00 A                    | 30,00 A   |                     | 0,01 A     | 30,00 A  | 0,00 A     | 0,36 A        | 2,00                    |
| 32,00 A                    | 32,00 A   | 50,00 A             | 0,01 A     | 32,00 A  | 0,00 A     | 0,37 A        | 2,00                    |
| 35,00 A                    | 35,00 A   |                     | 0,01 A     | 35,00 A  | 0,00 A     | 0,39 A        | 2,00                    |
| 40,00 A                    | 40,00 A   |                     | 0,01 A     | 40,00 A  | 0,00 A     | 0,43 A        | 2,00                    |
| 50,00 A                    | 50,00 A   |                     | 0,01 A     | 50,00 A  | 0,00 A     | 0,50 A        | 2,00                    |
| 55,00 A                    | 55,00 A   |                     | 0,01 A     | 55,00 A  | 0,00 A     | 0,53 A        | 2,00                    |
| 60,00 A                    | 60,00 A   | 1000,00 A           | 0,01 A     | 60,00 A  | 0,00 A     | 0,57 A        | 2,00                    |
| 80,00 A                    | 80,00 A   |                     | 0,01 A     | 80,00 A  | 0,00 A     | 0,71 A        | 2,00                    |
| 100,00 A                   | 99,99 A   |                     | 0,01 A     | 100,00 A | 0,01 A     | 0,84 A        | 2,00                    |
| 150,0 A                    | 150,0 A   |                     | 0,01 A     | 150,00 A | 0,0 A      | 1,2 A         | 2,00                    |
| 200,0 A                    | 200,0 A   |                     | 0,01 A     | 200,00 A | 0,0 A      | 1,5 A         | 2,00                    |

*Nota.* La pinza amperimétrica utilizada es de la marca Peak Tech, modelo 1670.

**Tabla 19**

*Ecuación para rangos de medición de 1 A a 200 A en DC.*

| Ecuación para la Función Corriente Continua |        | Intervalo de Medición |
|---|--------|-----------------------|
| 21 $\mu$ A/A                                | 5,7 mA | (1 a 20) A            |
| 6,9 mA/A                                    | 0,15 A | (20 a 40) A           |
| 6,8 mA/A                                    | 0,16 A | (40 a 200) A          |

**Tabla 20**

*Resultados para rango de medición de 200 A a 1000 A en DC.*

| Función Corriente Continua |           |                     |            |           |            |               |                         |
|----------------------------|-----------|---------------------|------------|-----------|------------|---------------|-------------------------|
| Patrón                     |           | Ítem de Calibración |            |           | Resultados |               |                         |
| Aplicada                   | Corregida | Rango               | Resolución | Lectura   | Error      | Incertidumbre | Factor de cobertura (k) |
| 200,0 A                    | 200,0 A   | 1000,00 A           | 0,01 A     | 200,00 A  | 0,0 A      | 1,6 A         | 2,00                    |
| 250,0 A                    | 250,0 A   |                     | 0,01 A     | 250,00 A  | 0,0 A      | 1,8 A         | 2,00                    |
| 300,0 A                    | 300,0 A   |                     | 0,01 A     | 300,00 A  | 0,0 A      | 2,1 A         | 2,00                    |
| 400,0 A                    | 400,0 A   |                     | 0,01 A     | 400,00 A  | 0,0 A      | 2,6 A         | 2,00                    |
| 450,0 A                    | 450,0 A   |                     | 0,01 A     | 450,00 A  | 0,0 A      | 2,9 A         | 2,00                    |
| 500,0 A                    | 500,0 A   | 1000,00 A           | 0,01 A     | 500,00 A  | 0,0 A      | 3,2 A         | 2,00                    |
| 550,0 A                    | 550,0 A   |                     | 0,01 A     | 550,00 A  | 0,0 A      | 3,4 A         | 2,00                    |
| 600,0 A                    | 600,0 A   |                     | 0,01 A     | 600,00 A  | 0,0 A      | 3,7 A         | 2,00                    |
| 650,0 A                    | 649,9 A   |                     | 0,01 A     | 650,00 A  | 0,1 A      | 4,0 A         | 2,00                    |
| 700,0 A                    | 699,9 A   |                     | 0,01 A     | 700,00 A  | 0,1 A      | 4,2 A         | 2,00                    |
| 750,0 A                    | 749,9 A   | 1000,00 A           | 0,01 A     | 750,00 A  | 0,1 A      | 4,5 A         | 2,00                    |
| 800,0 A                    | 799,9 A   |                     | 0,01 A     | 800,00 A  | 0,1 A      | 4,8 A         | 2,00                    |
| 900,0 A                    | 899,9 A   |                     | 0,01 A     | 900,00 A  | 0,1 A      | 5,3 A         | 2,00                    |
| 950,0 A                    | 949,9 A   |                     | 0,01 A     | 950,00 A  | 0,1 A      | 5,6 A         | 2,00                    |
| 1000,0 A                   | 999,9 A   |                     | 0,01 A     | 1000,00 A | 0,1 A      | 5,8 A         | 2,00                    |

*Nota.* La pinza amperimétrica utilizada es de la marca Peak Tech, modelo 1670.

**Tabla 21**

*Ecuación para rangos de medición de 200 A a 1000 A en DC.*

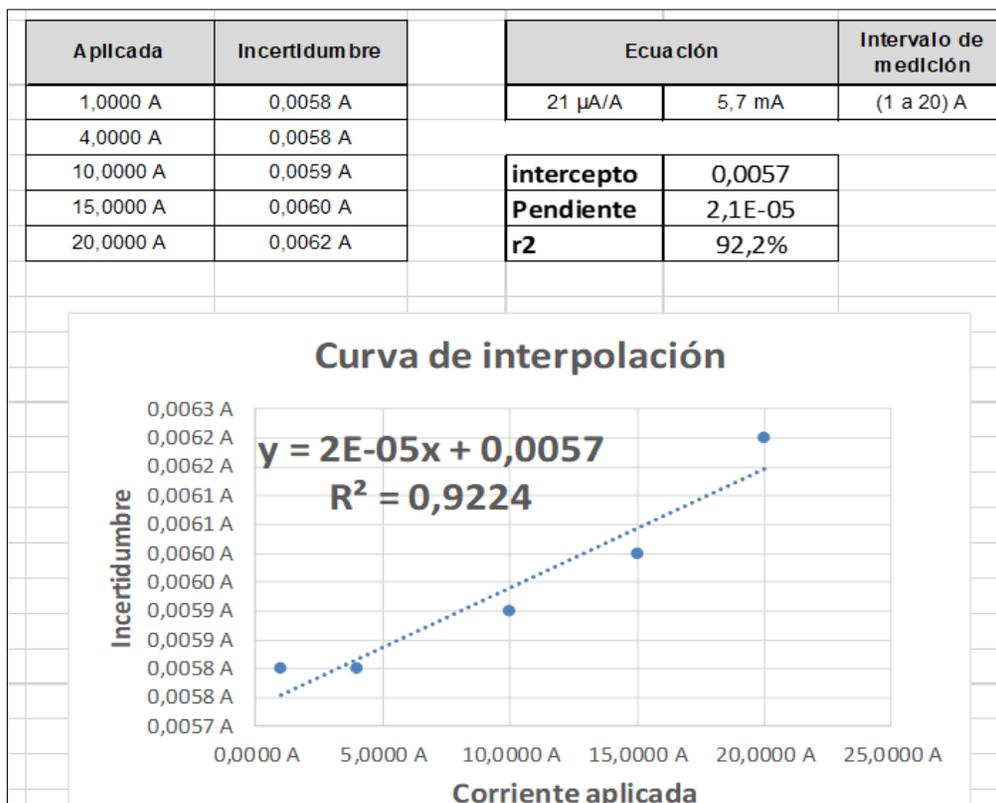
| Ecuación para la Función Corriente Continua |        | Intervalo de Medición |
|---|--------|-----------------------|
| 5,3 mA/A                                    | 0,50 A | (200 a 1000) A        |

Para explicar cómo se obtuvo los intervalos de medición y la función de corriente, se tomarán los resultados de la tabla 18 como ejemplo.

El primer paso es obtener el intervalo de medición adecuado, para ello se analizó el coeficiente de determinación representado como  $r^2$ , este estadístico representa la bondad del ajuste y se calculó fácilmente usando las herramientas estadísticas que brinda el procesador de hojas de cálculo de Excel. Según Zapata (2019) si el 100% de los datos se encuentran sobre la línea de función de regresión, el coeficiente de determinación es 1. Sin embargo, si para el conjunto de datos que se analiza el coeficiente es menor a 0,5, entonces el ajuste no se adapta satisfactoriamente a los datos, siendo necesario buscar otra función. En la figura 41 se muestra el valor del coeficiente de determinación  $r^2$ , el cual es de 0,922 esto quiere decir que es 92,2% confiable aplicar un ajuste lineal. Como segundo paso se calcularon los valores de la pendiente y el intercepto de la ecuación de la recta junto con el  $r^2$ . Esto se realizó debido a que la gráfica no muestra de manera completa las constantes de la ecuación. Por último, se presenta la ecuación en función de la magnitud de corriente, considerando las unidades adecuadas.

**Figura 41**

*Elaboración de ecuación de CMC e intervalo de medición.*



Todas las ecuaciones de la recta obtenidas para diferentes intervalos de medición se resumen en la figura 42.

**Figura 42**

*Nueva capacidad de medición y calibración del laboratorio.*

| MAGNITUD Y SUBMAGNITUD               | CAMPO DE MEDIDA                                 |  | INCERTIDUMBRE (*)  | INSTRUMENTOS A CALIBRAR Y REFERENCIA  |
|--------------------------------------|---|--|--|---|
| (ELECTRICIDAD)<br>INTENSIDAD AC Y DC | Corriente AC<br>Pinza<br>amperimétrica<br>60 Hz | (3 a 15) mA<br>(15 a 30) mA<br>(30 a 120) mA<br>(120 a 300) mA<br><br>(0,3 a 1,5) A<br>(1,5 a 2,1) A<br>(2,1 a 3,0) A<br>(3,0 a 20) A<br><br>(20 a 90) A<br>(90 a 500) A<br>(500 a 1000) A | 0,13 mA/A + 8,9 μA<br>0,26 mA/A + 7,2 μA<br>0,20 mA/A + 53 μA<br>0,35 mA/A + 36 μA<br><br>1,0 mA/A + 0,67 mA<br>4,2 mA/A - 4,1 mA<br>1,0 mA/A + 2,6mA<br>1,0 mA/A + 4,5mA<br><br>3,2 mA/A + 72 mA<br>3,3 mA/A + 93 mA<br>3,2 mA/A + 100 mA | Pinzas<br>Amperimétricas<br><br>PC-025. INACAL.<br>PRIMERA EDICIÓN<br>DIGITAL. ENERO<br>2019. |
|                                      | Corriente DC<br>Pinza<br>amperimétrica          | (2.1 a 20.99) mA<br>(21 a 100) mA<br><br>(1 a 20) A<br>(20 a 40) A<br>(40 a 200) A<br>(200 a 1000) A   | 0,0058 mA<br>0,058 mA<br><br>21 μA/A + 5,7 mA<br>6,9 mA/A + 0,15 A<br>6,8 mA/A + 0,16 A<br>5,3 mA/A + 0,50 A   |   |

*Nota.* (\*) La incertidumbre corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95,45 %. Esta incertidumbre corresponde a la CMC del laboratorio.

Para comprender como se debe calcular el valor de la CMC para un valor de corriente, se presenta el siguiente ejemplo: **¿Cuál sería la CMC para el punto de calibración de 4 A DC?** Lo primero que se debe revisar es el tipo de corriente, en este caso es del tipo corriente continua por ello se usará los resultados obtenidos en la fila de Corriente DC Pinza amperimétrica que aparece en la figura 42, luego se ubica el valor requerido la columna de campos de medida. Para este ejemplo el valor de 4 A DC se encuentra en el rango de (1 a 20) A lo que le corresponde una incertidumbre expresada con la siguiente ecuación  $21 \mu\text{A/A} + 5,7 \text{ mA}$ . Reemplazando el valor de 4 A DC en la ecuación de la recta se tiene lo siguiente:

$21 \mu\text{A/A} \times 4 \text{ A} + 5,7 \text{ mA} = 5,784 \text{ mA}$  que es equivalente a 0,00578 A, redondeado a 2 cifras significativas resultaría 0,0058 A. El mismo resultado obtenido en la tabla 18.

### 3.3.3. Resultados de la evaluación de veracidad

**Figura 43**

*Pinza amperimétrica – 2,1 mA DC.*

| Tabla I. Resultados experimentales   |                   |      |                              |         |      |
|--|-------------------|------|------------------------------|---------|------|
|  | Grupos (Técnicos) |      |                              |         |      |
|  | T1                | T2   | T3                           | T4      | T5   |
|  | 2,11              | 2,10 | 2,11                         | 2,10    | 2,10 |
|  | 2,10              | 2,10 | 2,10                         | 2,10    | 2,11 |
|  | 2,10              | 2,10 | 2,10                         | 2,10    | 2,11 |
| <b>Promedio</b>  | 2,10              | 2,10 | 2,10                         | 2,10    | 2,11 |
| <b>Promedio de Promedios</b>   | 2,10              |      |                              |         |      |
| <b>Desv. Std</b>   | 2,789E-03         |      | n =                          | 5       |      |
| <b>Valor de referencia</b>   | 2,10 mA           |      | <b>SESGO</b>                 | 0,00 mA |      |
| Tabla II. Prueba de t media  |                   |      |                              |         |      |
| <b>t<sub>experimental</sub> =</b>  | 0,5345            |      | <b>t<sub>crítico</sub> =</b> | 2,7764  |      |
| <i>t<sub>experimental</sub> &lt; t<sub>crítico</sub>, Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, concluyendo que las medias de los p grupos son todas iguales.</i> |                   |      |                              |         |      |

**Figura 44**

*Pinza amperimétrica – 21 mA DC.*

| Tabla I. Resultados experimentales   |                   |      |                              |        |      |
|--|-------------------|------|------------------------------|--------|------|
|  | Grupos (Técnicos) |      |                              |        |      |
|  | T1                | T2   | T3                           | T4     | T5   |
|  | 21,0              | 20,9 | 20,9                         | 21,0   | 20,9 |
|  | 21,0              | 21,0 | 20,9                         | 21,0   | 20,9 |
|  | 20,9              | 21,0 | 21,0                         | 21,1   | 21,0 |
| <b>Promedio</b>  | 21,0              | 21,0 | 20,9                         | 21,0   | 20,9 |
| <b>Promedio de Promedios</b>   | 21,0              |      |                              |        |      |
| <b>Desv. Std</b>   | 4,082E-02         |      | n =                          | 5      |      |
| <b>Valor de referencia</b>   | 21,0 mA           |      | <b>SESGO</b>                 | 0,0 mA |      |
| Tabla II. Prueba de t media  |                   |      |                              |        |      |
| <b>t<sub>experimental</sub> =</b>  | 1,8257            |      | <b>t<sub>crítico</sub> =</b> | 2,7764 |      |
| <i>t<sub>experimental</sub> &lt; t<sub>crítico</sub>, Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, concluyendo que las medias de los p grupos son todas iguales.</i> |                   |      |                              |        |      |

**Figura 45**

*Pinza amperimétrica – 100 mA DC.*

| Tabla I. Resultados experimentales   |                   |              |                              |        |       |
|--|-------------------|--------------|------------------------------|--------|-------|
|  | Grupos (Técnicos) |              |                              |        |       |
|  | T1                | T2           | T3                           | T4     | T5    |
|  | 100,0             | 100,0        | 99,9                         | 100,0  | 99,9  |
|  | 100,0             | 100,0        | 100,0                        | 100,0  | 100,0 |
|  | 99,9              | 100,0        | 100,0                        | 100,0  | 100,0 |
| <b>Promedio</b>  | 100,0             | 100,0        | 100,0                        | 100,0  | 100,0 |
| <b>Promedio de Promedios</b>   | 100,0             |              |                              |        |       |
| <b>Desv. Std</b>   | 1,826E-02         |              | n =                          | 5      |       |
| <b>Valor de referencia</b>   | 100,0 mA          | <b>SESGO</b> |                              | 0,0 mA |       |
| Tabla II. Prueba de t media  |                   |              |                              |        |       |
| <b>t<sub>experimental</sub> =</b>  | 1,6330            |              | <b>t<sub>crítico</sub> =</b> | 2,7764 |       |
| <i>t<sub>experimental</sub> &lt; t<sub>crítico</sub>, Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, concluyendo que las medias de los p grupos son todas iguales.</i> |                   |              |                              |        |       |

**Figura 46**

*Pinza amperimétrica – 20 A DC.*

| Tabla I. Resultados experimentales   |                   |              |                              |        |       |
|--|-------------------|--------------|------------------------------|--------|-------|
|  | Grupos (Técnicos) |              |                              |        |       |
|  | T1                | T2           | T3                           | T4     | T5    |
|  | 19,98             | 19,99        | 20,00                        | 19,99  | 19,98 |
|  | 19,99             | 19,99        | 19,99                        | 19,99  | 19,98 |
|  | 19,98             | 19,98        | 19,99                        | 20,01  | 19,99 |
| <b>Promedio</b>  | 19,98             | 19,99        | 19,99                        | 20,00  | 19,98 |
| <b>Promedio de Promedios</b>   | 19,99             |              |                              |        |       |
| <b>Desv. Std</b>   | 6,055E-03         |              | n =                          | 5      |       |
| <b>Valor de referencia</b>   | 19,98 A           | <b>SESGO</b> |                              | 0,01 A |       |
| Tabla II. Prueba de t media  |                   |              |                              |        |       |
| <b>t<sub>experimental</sub> =</b>  | 2,4618            |              | <b>t<sub>crítico</sub> =</b> | 2,7764 |       |
| <i>t<sub>experimental</sub> &lt; t<sub>crítico</sub>, Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, concluyendo que las medias de los p grupos son todas iguales.</i> |                   |              |                              |        |       |

### Figura 47

Pinza amperimétrica – 200 A DC.

| Tabla I. Resultados experimentales   |                   |        |                              |        |        |
|--|-------------------|--------|------------------------------|--------|--------|
|  | Grupos (Técnicos) |        |                              |        |        |
|  | T1                | T2     | T3                           | T4     | T5     |
|  | 198,13            | 198,14 | 198,14                       | 198,15 | 198,14 |
|  | 198,15            | 198,17 | 198,19                       | 198,17 | 198,20 |
|  | 198,17            | 198,12 | 198,15                       | 198,18 | 198,16 |
| <b>Promedio</b>  | 198,15            | 198,14 | 198,16                       | 198,17 | 198,17 |
| <b>Promedio de Promedios</b>   | 198,16            |        |                              |        |        |
| <b>Desv. Std</b>   | 1,038E-02         |        | n =                          | 5      |        |
| <b>Valor de referencia</b>   | 198,15 A          |        | <b>SESGO</b>                 | 0,01 A |        |
| Tabla II. Prueba de t media  |                   |        |                              |        |        |
| <b>t<sub>experimental</sub> =</b>  | 2,1539            |        | <b>t<sub>crítico</sub> =</b> | 2,7764 |        |
| <i>t<sub>experimental</sub> &lt; t<sub>crítico</sub>, Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, concluyendo que las medias de los p grupos son todas iguales.</i> |                   |        |                              |        |        |

### Figura 48

Pinza amperimétrica – 1000 A DC.

| Tabla I. Resultados experimentales   |                   |        |                              |         |        |
|--|-------------------|--------|------------------------------|---------|--------|
|  | Grupos (Técnicos) |        |                              |         |        |
|  | T1                | T2     | T3                           | T4      | T5     |
|  | 998,83            | 998,82 | 998,82                       | 999,78  | 997,79 |
|  | 997,79            | 997,74 | 997,76                       | 997,79  | 997,78 |
|  | 997,77            | 997,76 | 997,77                       | 997,81  | 997,81 |
| <b>Promedio</b>  | 998,13            | 998,11 | 998,12                       | 998,46  | 997,79 |
| <b>Promedio de Promedios</b>   | 998,12            |        |                              |         |        |
| <b>Desv. Std</b>   | 2,359E-01         |        | n =                          | 5       |        |
| <b>Valor de referencia</b>   | 998,13 A          |        | <b>SESGO</b>                 | -0,01 A |        |
| Tabla II. Prueba de t media  |                   |        |                              |         |        |
| <b>t<sub>experimental</sub> =</b>  | 0,0822            |        | <b>t<sub>crítico</sub> =</b> | 2,7764  |        |
| <i>t<sub>experimental</sub> &lt; t<sub>crítico</sub>, Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, concluyendo que las medias de los p grupos son todas iguales.</i> |                   |        |                              |         |        |

### Figura 49

Pinza amperimétrica – 3 mA AC.

| Tabla I. Resultados experimentales   |                   |      |                              |         |      |
|--|-------------------|------|------------------------------|---------|------|
|  | Grupos (Técnicos) |      |                              |         |      |
|  | T1                | T2   | T3                           | T4      | T5   |
|  | 3,02              | 3,02 | 3,03                         | 3,01    | 3,02 |
|  | 3,01              | 3,01 | 3,02                         | 3,02    | 3,01 |
|  | 3,02              | 3,02 | 3,02                         | 3,03    | 3,02 |
| <b>Promedio</b>  | 3,02              | 3,02 | 3,02                         | 3,02    | 3,02 |
| <b>Promedio de Promedios</b>   | 3,02              |      |                              |         |      |
| <b>Desv. Std</b>   | 2,981E-03         |      | n =                          | 5       |      |
| <b>Valor de referencia</b>   | 3,02 mA           |      | <b>SESGO</b>                 | 0,00 mA |      |
| Tabla II. Prueba de t media  |                   |      |                              |         |      |
| <b>t<sub>experimental</sub> =</b>  | 2,5000            |      | <b>t<sub>crítico</sub> =</b> | 2,7764  |      |
| <i>t<sub>experimental</sub> &lt; t<sub>crítico</sub>, Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, concluyendo que las medias de los p grupos son todas iguales.</i> |                   |      |                              |         |      |

### Figura 50

Pinza amperimétrica – 30 mA AC.

| Tabla I. Resultados experimentales   |                   |       |                              |         |       |
|--|-------------------|-------|------------------------------|---------|-------|
|  | Grupos (Técnicos) |       |                              |         |       |
|  | T1                | T2    | T3                           | T4      | T5    |
|  | 30,12             | 30,12 | 30,12                        | 30,10   | 30,10 |
|  | 30,10             | 30,10 | 30,11                        | 30,11   | 30,10 |
|  | 30,10             | 30,12 | 30,10                        | 30,12   | 30,11 |
| <b>Promedio</b>  | 30,11             | 30,11 | 30,11                        | 30,11   | 30,10 |
| <b>Promedio de Promedios</b>   | 30,11             |       |                              |         |       |
| <b>Desv. Std</b>   | 3,801E-03         |       | n =                          | 5       |       |
| <b>Valor de referencia</b>   | 30,11 mA          |       | <b>SESGO</b>                 | 0,00 mA |       |
| Tabla II. Prueba de t media  |                   |       |                              |         |       |
| <b>t<sub>experimental</sub> =</b>  | 1,9612            |       | <b>t<sub>crítico</sub> =</b> | 2,7764  |       |
| <i>t<sub>experimental</sub> &lt; t<sub>crítico</sub>, Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, concluyendo que las medias de los p grupos son todas iguales.</i> |                   |       |                              |         |       |

## Figura 51

Pinza amperimétrica – 300 mA AC.

| Tabla I. Resultados experimentales   |                   |              |                              |         |       |
|--|-------------------|--------------|------------------------------|---------|-------|
|  | Grupos (Técnicos) |              |                              |         |       |
|  | T1                | T2           | T3                           | T4      | T5    |
|  | 299,8             | 299,7        | 299,7                        | 299,7   | 299,8 |
|  | 299,8             | 299,5        | 299,5                        | 299,6   | 299,7 |
|  | 299,7             | 299,7        | 299,3                        | 299,7   | 299,6 |
| <b>Promedio</b>  | 299,8             | 299,6        | 299,5                        | 299,7   | 299,7 |
| <b>Promedio de Promedios</b>   | 299,7             |              |                              |         |       |
| <b>Desv. Std</b>   | 9,888E-02         |              | n =                          | 5       |       |
| <b>Valor de referencia</b>   | 299,8 mA          | <b>SESGO</b> |                              | -0,1 mA |       |
| Tabla II. Prueba de t media  |                   |              |                              |         |       |
| <b>t<sub>experimental</sub> =</b>  | 2,2613            |              | <b>t<sub>crítico</sub> =</b> | 2,7764  |       |
| <i>t<sub>experimental</sub> &lt; t<sub>crítico</sub>, Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, concluyendo que las medias de los p grupos son todas iguales.</i> |                   |              |                              |         |       |

## Figura 52

Pinza amperimétrica – 20 A AC.

| Tabla I. Resultados experimentales   |                   |              |                              |        |       |
|--|-------------------|--------------|------------------------------|--------|-------|
|  | Grupos (Técnicos) |              |                              |        |       |
|  | T1                | T2           | T3                           | T4     | T5    |
|  | 18,53             | 18,54        | 18,53                        | 18,56  | 18,54 |
|  | 18,54             | 18,56        | 18,54                        | 18,53  | 18,53 |
|  | 18,56             | 18,54        | 18,54                        | 18,54  | 18,53 |
| <b>Promedio</b>  | 18,54             | 18,55        | 18,54                        | 18,54  | 18,53 |
| <b>Promedio de Promedios</b>   | 18,54             |              |                              |        |       |
| <b>Desv. Std</b>   | 5,477E-03         |              | n =                          | 5      |       |
| <b>Valor de referencia</b>   | 18,54 A           | <b>SESGO</b> |                              | 0,00 A |       |
| Tabla II. Prueba de t media  |                   |              |                              |        |       |
| <b>t<sub>experimental</sub> =</b>  | 1,3608            |              | <b>t<sub>crítico</sub> =</b> | 2,7764 |       |
| <i>t<sub>experimental</sub> &lt; t<sub>crítico</sub>, Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, concluyendo que las medias de los p grupos son todas iguales.</i> |                   |              |                              |        |       |

### Figura 53

Pinza amperimétrica – 500 A AC.

| Tabla I. Resultados experimentales   |                   |              |                              |        |        |
|--|-------------------|--------------|------------------------------|--------|--------|
|  | Grupos (Técnicos) |              |                              |        |        |
|  | T1                | T2           | T3                           | T4     | T5     |
|  | 497,28            | 497,26       | 497,27                       | 497,27 | 497,26 |
|  | 497,26            | 497,27       | 498,06                       | 498,05 | 498,08 |
|  | 497,27            | 497,28       | 497,28                       | 497,26 | 497,26 |
| <b>Promedio</b>  | 497,27            | 497,27       | 497,54                       | 497,53 | 497,53 |
| <b>Promedio de Promedios</b>   | 497,43            |              |                              |        |        |
| <b>Desv. Std</b>   | 1,437E-01         |              | n =                          | 5      |        |
| <b>Valor de referencia</b>   | 497,27 A          | <b>SESGO</b> |                              | 0,16 A |        |
| Tabla II. Prueba de t media  |                   |              |                              |        |        |
| <b>t<sub>experimental</sub> =</b>  | 2,4902            |              | <b>t<sub>crítico</sub> =</b> | 2,7764 |        |
| <i>t<sub>experimental</sub> &lt; t<sub>crítico</sub>, Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, concluyendo que las medias de los p grupos son todas iguales.</i> |                   |              |                              |        |        |

### Figura 54

Pinza amperimétrica – 1000 A AC.

| Tabla I. Resultados experimentales   |                   |              |                              |        |       |
|--|-------------------|--------------|------------------------------|--------|-------|
|  | Grupos (Técnicos) |              |                              |        |       |
|  | T1                | T2           | T3                           | T4     | T5    |
|  | 996,6             | 996,6        | 997,1                        | 997,1  | 996,6 |
|  | 996,6             | 996,6        | 996,6                        | 996,6  | 996,6 |
|  | 996,6             | 996,6        | 996,6                        | 996,6  | 996,6 |
| <b>Promedio</b>  | 996,6             | 996,6        | 996,8                        | 996,8  | 996,6 |
| <b>Promedio de Promedios</b>   | 996,7             |              |                              |        |       |
| <b>Desv. Std</b>   | 8,952E-02         |              | n =                          | 5      |       |
| <b>Valor de referencia</b>   | 996,6 A           | <b>SESGO</b> |                              | 0,1 A  |       |
| Tabla II. Prueba de t media  |                   |              |                              |        |       |
| <b>t<sub>experimental</sub> =</b>  | 2,4977            |              | <b>t<sub>crítico</sub> =</b> | 2,7764 |       |
| <i>t<sub>experimental</sub> &lt; t<sub>crítico</sub>, Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, concluyendo que las medias de los p grupos son todas iguales.</i> |                   |              |                              |        |       |

### 3.3.4. Resultados de la evaluación de la precisión

**Figura 55**

*Pinza amperimétrica – 2,1 mA DC.*

| Tabla I. Resultados experimentales |                   |      |                |      |       |
|------------------------------------|-------------------|------|----------------|------|-------|
| Pruebas                            | Resultados en mA  |      |                |      |       |
|                                    | Grupos (Técnicos) |      |                |      |       |
|                                    | T1                | T2   | T3             | T4   | T5    |
| Test 1                             | 2,11              | 2,10 | 2,11           | 2,10 | 2,10  |
| Test 2                             | 2,10              | 2,10 | 2,10           | 2,10 | 2,11  |
| Test 3                             | 2,10              | 2,10 | 2,10           | 2,10 | 2,11  |
| n = 3                              |                   |      | ρ = # grupos   |      | media |
| p = 5                              |                   |      | N = # de datos |      | 2,10  |
| N = 15                             |                   |      |                |      |       |

| Tabla II. Cálculo de los cuadrados medios entre-grupos y dentro-grupos |                        |                        |                       |
|--|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Fuente de variación  | Suma de cuadrados (SS) | Grados de Libertad (v) | Cuadrados medios (MS) |
| Entre-grupos (B)   | Sse = 9,3333E-05       | ve = 4                 | MSe = 2,3333E-05      |
| Dentro-grupos (W)  | SSd = 2,0000E-04       | vd = 10                | MSd = 2,0000E-05      |
| Total (T)  | SSt = 2,9333E-04       | vt = 14                |                       |

| Tabla III. Prueba de significancia estadística |                      |          |                            |
|--|----------------------|----------|----------------------------|
| F=MSe/MSd                                      | F <sub>0,05</sub>    | P-value  | Significancia Estadística? |
| F <sub>calculado</sub>                         | F <sub>crítico</sub> | α = 0,05 |                            |
| 1,17   | 3,48                 | 0,38     | No                         |

Los valores Fcalculado, F crítico y P permitirán extraer conclusiones sobre si hay una diferencia estadísticamente significativa entre-grupos. Para esto, se usa la prueba-F. Siendo *sd*, *se* y *st* las desviaciones estándares dentro-grupos, entre-grupos y total respectivamente.

**Fcalculado < Fcrítico, se concluye que no existen diferencias significativas entre grupos**

| Tabla IV. Cálculo de las varianzas dentro de los grupos (s <sup>2</sup> d) y entre grupos (s <sup>2</sup> e) |   |  |           |
|--|---|--|-----------|
| s <sub>d</sub> <sup>2</sup> = MS <sub>d</sub>  | s <sub>t</sub> <sup>2</sup> = s <sub>e</sub> <sup>2</sup> + s <sub>d</sub> <sup>2</sup> | s <sub>e</sub> <sup>2</sup> = (MS <sub>e</sub> - MS <sub>d</sub> ) / n |           |
|  |   | s <sub>e</sub> <sup>2</sup> =  | 1,111E-06 |
| s <sub>d</sub> <sup>2</sup>  | s <sub>e</sub> <sup>2</sup>   | s <sub>t</sub> <sup>2</sup>  |           |
| 2,000E-05  | 1,111E-06   | 2,111E-05  |           |

| Tabla V. Desvío estándar en condiciones de repetibilidad (Sd) y precisión intralaboratorio (St) |                |                |
|---|----------------|----------------|
| S <sub>d</sub>  | S <sub>e</sub> | S <sub>t</sub> |
| 4,472E-03   | 1,054E-03      | 4,595E-03      |

| Tabla VI. Cálculo de coeficientes de variación en condiciones de repetibilidad (CVR) y precisión intralaboratorio (CVWL) |        |                        |      |          |
|--|--------|------------------------|------|----------|
| CVR=(Sd/media) x100  |        | CVWL=(St/media) x100   |      |          |
| CVR  | CVWL   | Criterio de Aceptación | 2,0% | ACEPTADO |
| 0,21 %   | 0,22 % |                        |      |          |

**Figura 56**

*Pinza amperimétrica – 21 mA DC.*

| Tabla I. Resultados experimentales |                   |                |      |      |       |
|------------------------------------|-------------------|----------------|------|------|-------|
| Pruebas                            | Resultados en mA  |                |      |      |       |
|                                    | Grupos (Técnicos) |                |      |      |       |
|                                    | T1                | T2             | T3   | T4   | T5    |
| Test 1                             | 21,0              | 20,9           | 20,9 | 21,0 | 20,9  |
| Test 2                             | 21,0              | 21,0           | 20,9 | 21,0 | 20,9  |
| Test 3                             | 20,9              | 21,0           | 21,0 | 21,1 | 21,0  |
| n = 3                              |                   | ρ = # grupos   |      |      | media |
| p = 5                              |                   | N = # de datos |      |      | 21,0  |
| N = 15                             |                   |                |      |      |       |

| Tabla II. Cálculo de los cuadrados medios entre-grupos y dentro-grupos |                              |                        |                              |
|--|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Fuente de variación  | Suma de cuadrados (SS)       | Grados de Libertad (v) | Cuadrados medios (MS)        |
| Entre-grupos (B)   | S <sub>se</sub> = 2,0000E-02 | ve = 4                 | MSe = 5,0000E-03             |
| Dentro-grupos (W)  | SS <sub>d</sub> = 3,3333E-02 | vd = 10                | MS <sub>d</sub> = 3,3333E-03 |
| Total (T)  | SS <sub>t</sub> = 5,3333E-02 | vt = 14                |                              |

| Tabla III. Prueba de significancia estadística |                      |          |                            |
|--|----------------------|----------|----------------------------|
| F=MSe/MSd                                      | F <sub>0,05</sub>    | P-value  | Significancia Estadística? |
| F <sub>calculado</sub>                         | F <sub>crítico</sub> | α = 0,05 |                            |
| 1,50   | 3,48                 | 0,27     |                            |

Los valores F calculado, F crítico y P permitirán extraer conclusiones sobre si hay una diferencia estadísticamente significativa entre-grupos. Para esto, se usa la prueba-F. Siendo *sd*, *se* y *st* las desviaciones estándares dentro-grupos, entre-grupos y total respectivamente.

*Fcalculado < Fcrítico, se concluye que no existen diferencias significativas entre grupos*

| Tabla IV. Cálculo de las varianzas dentro de los grupos (s <sup>2</sup> <sub>d</sub> ) y entre grupos (s <sup>2</sup> <sub>e</sub> ) |                             |   |
|--|-----------------------------|---|
| $s_d^2 = MS_d$   | $s_t^2 = s_e^2 + s_d^2$     | $s_e^2 = (MS_e - MS_d) / n$             |
|  |                             | S <sup>2</sup> <sub>e</sub> = 5,556E-04 |
| S <sup>2</sup> <sub>d</sub>  | S <sup>2</sup> <sub>e</sub> | S <sup>2</sup> <sub>t</sub>             |
| 3,333E-03  | 5,556E-04                   | 3,889E-03                               |

Nota: Si el resultado de *se*<sup>2</sup> es negativo, se le asignara el valor de cero.

| Tabla V. Desvío estándar en condiciones de repetibilidad (S <sub>d</sub> ) y precisión intralaboratorio (S <sub>t</sub> ) |                |                |
|---|----------------|----------------|
| S <sub>d</sub>  | S <sub>e</sub> | S <sub>t</sub> |
| 5,774E-02   | 2,357E-02      | 6,236E-02      |

| Tabla VI. Cálculo de coeficientes de variación en condiciones de repetibilidad (CVR) y precisión intralaboratorio (CVWL) |        |                                   |      |          |
|--|--------|-----------------------------------|------|----------|
| CVR=(S <sub>d</sub> /media) x100   |        | CVWL=(S <sub>t</sub> /media) x100 |      |          |
| CVR  | CVWL   | Criterio de Aceptación            | 2,0% | ACEPTADO |
| 0,28 %   | 0,30 % |                                   |      |          |

**Figura 57**

*Pinza amperimétrica – 100 mA DC.*

| Tabla I. Resultados experimentales |                   |                |       |       |       |
|------------------------------------|-------------------|----------------|-------|-------|-------|
| Pruebas                            | Resultados en mA  |                |       |       |       |
|                                    | Grupos (Técnicos) |                |       |       |       |
|                                    | T1                | T2             | T3    | T4    | T5    |
| Test 1                             | 100,0             | 100,0          | 99,9  | 100,0 | 99,9  |
| Test 2                             | 100,0             | 100,0          | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| Test 3                             | 99,9              | 100,0          | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| n = 3                              |                   | ρ = # grupos   |       |       | media |
| p = 5                              |                   | N = # de datos |       |       | 100,0 |
| N = 15                             |                   |                |       |       |       |

| Tabla II. Cálculo de los cuadrados medios entre-grupos y dentro-grupos |                              |                        |                              |
|--|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Fuente de variación  | Suma de cuadrados (SS)       | Grados de Libertad (v) | Cuadrados medios (MS)        |
| Entre-grupos (B)   | S <sub>se</sub> = 4,0000E-03 | ve = 4                 | MSe = 1,0000E-03             |
| Dentro-grupos (W)  | SS <sub>d</sub> = 2,0000E-02 | vd = 10                | MS <sub>d</sub> = 2,0000E-03 |
| Total (T)  | SS <sub>t</sub> = 2,4000E-02 | vt = 14                |                              |

| Tabla III. Prueba de significancia estadística |                      |          |                            |
|--|----------------------|----------|----------------------------|
| F=MSe/MSd                                      | F <sub>0,05</sub>    | P-value  | Significancia Estadística? |
| F <sub>calculado</sub>                         | F <sub>crítico</sub> | α = 0.05 |                            |
| 0,50   | 3,48                 | 0,74     | No                         |

Los valores F calculado, F crítico y P permitirán extraer conclusiones sobre si hay una diferencia estadísticamente significativa entre-grupos. Para esto, se usa la prueba-F. Siendo *sd*, *se* y *st* las desviaciones estándares dentro-grupos, entre-grupos y total respectivamente.

*Fcalculado < Fcrítico, se concluye que no existen diferencias significativas entre grupos*

| Tabla IV. Cálculo de las varianzas dentro de los grupos (s <sup>2</sup> <sub>d</sub> ) y entre grupos (s <sup>2</sup> <sub>e</sub> ) |   |  |
|--|---|--|
| s <sub>d</sub> <sup>2</sup> = MS <sub>d</sub>  | s <sub>t</sub> <sup>2</sup> = s <sub>e</sub> <sup>2</sup> + s <sub>d</sub> <sup>2</sup> | s <sub>e</sub> <sup>2</sup> = (MS <sub>e</sub> - MS <sub>d</sub> ) / n |
|  |   | S <sub>e</sub> <sup>2</sup> = -3,333E-04                               |
| S <sub>d</sub> <sup>2</sup>  | S <sub>e</sub> <sup>2</sup>   | S <sub>t</sub> <sup>2</sup>  |
| 2,000E-03  | 0,000E+00   | 2,000E-03  |

Nota: Si el resultado de s<sub>e</sub><sup>2</sup> es negativo, se le asignara el valor de cero.

| Tabla V. Desvío estándar en condiciones de repetibilidad (S <sub>d</sub> ) y precisión intralaboratorio (S <sub>t</sub> ) |                |                |
|---|----------------|----------------|
| S <sub>d</sub>  | S <sub>e</sub> | S <sub>t</sub> |
| 4,472E-02   | 0,000E+00      | 4,472E-02      |

| Tabla VI. Cálculo de coeficientes de variación en condiciones de repetibilidad (CVR) y precisión intralaboratorio (CVWL) |        |                                   |      |          |
|--|--------|-----------------------------------|------|----------|
| CVR=(S <sub>d</sub> /media) x100   |        | CVWL=(S <sub>t</sub> /media) x100 |      |          |
| CVR  | CVWL   | Criterio de Aceptación            | 2,0% | ACEPTADO |
| 0,04 %   | 0,04 % |                                   |      |          |

**Figura 58**

*Pinza amperimétrica – 20 A DC.*

| Tabla I. Resultados experimentales |                   |                |       |       |       |
|------------------------------------|-------------------|----------------|-------|-------|-------|
| Pruebas                            | Resultados en A   |                |       |       |       |
|                                    | Grupos (Técnicos) |                |       |       |       |
|                                    | T1                | T2             | T3    | T4    | T5    |
| Test 1                             | 19,98             | 19,99          | 20,00 | 19,99 | 19,98 |
| Test 2                             | 19,99             | 19,99          | 19,99 | 19,99 | 19,98 |
| Test 3                             | 19,98             | 19,98          | 19,99 | 20,01 | 19,99 |
| n = 3                              |                   | ρ = # grupos   |       |       | media |
| p = 5                              |                   | N = # de datos |       |       | 19,99 |
| N = 15                             |                   |                |       |       |       |

| Tabla II. Cálculo de los cuadrados medios entre-grupos y dentro-grupos |                              |                        |                              |
|--|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Fuente de variación  | Suma de cuadrados (SS)       | Grados de Libertad (v) | Cuadrados medios (MS)        |
| Entre-grupos (B)   | S <sub>se</sub> = 4,4000E-04 | ve = 4                 | MSe = 1,1000E-04             |
| Dentro-grupos (W)  | SS <sub>d</sub> = 5,3333E-04 | vd = 10                | MS <sub>d</sub> = 5,3333E-05 |
| Total (T)  | SS <sub>t</sub> = 9,7333E-04 | vt = 14                |                              |

| Tabla III. Prueba de significancia estadística |                      |          |                            |
|--|----------------------|----------|----------------------------|
| F=MSe/MSd                                      | F <sub>0,05</sub>    | P-value  | Significancia Estadística? |
| F <sub>calculado</sub>                         | F <sub>crítico</sub> | α = 0.05 |                            |
| 2,06   | 3,48                 | 0,16     | No                         |

Los valores F calculado, F crítico y P permitirán extraer conclusiones sobre si hay una diferencia estadísticamente significativa entre-grupos. Para esto, se usa la prueba-F. Siendo *sd*, *se* y *st* las desviaciones estándares dentro-grupos, entre-grupos y total respectivamente.

*Fcalculado < Fcrítico, se concluye que no existen diferencias significativas entre grupos*

| Tabla IV. Cálculo de las varianzas dentro de los grupos (s <sup>2</sup> <sub>d</sub> ) y entre grupos (s <sup>2</sup> <sub>e</sub> ) |   |  |
|--|---|--|
| s <sub>d</sub> <sup>2</sup> = MS <sub>d</sub>  | s <sub>t</sub> <sup>2</sup> = s <sub>e</sub> <sup>2</sup> + s <sub>d</sub> <sup>2</sup> | s <sub>e</sub> <sup>2</sup> = (MS <sub>e</sub> - MS <sub>d</sub> ) / n |
|  |   | S <sub>e</sub> <sup>2</sup> = 1,889E-05                                |
| S <sub>d</sub> <sup>2</sup>  | S <sub>e</sub> <sup>2</sup>   | S <sub>t</sub> <sup>2</sup>  |
| 5,333E-05  | 1,889E-05   | 7,222E-05  |

Nota: Si el resultado de se<sup>2</sup> es negativo, se le asignara el valor de cero.

| Tabla V. Desvío estándar en condiciones de repetibilidad (S <sub>d</sub> ) y precisión intralaboratorio (S <sub>t</sub> ) |                |                |
|---|----------------|----------------|
| S <sub>d</sub>  | S <sub>e</sub> | S <sub>t</sub> |
| 7,303E-03   | 4,346E-03      | 8,498E-03      |

| Tabla VI. Cálculo de coeficientes de variación en condiciones de repetibilidad (CVR) y precisión intralaboratorio (CVWL) |        |                                   |      |          |
|--|--------|-----------------------------------|------|----------|
| CVR=(S <sub>d</sub> /media) x100   |        | CVWL=(S <sub>t</sub> /media) x100 |      |          |
| CVR  | CVWL   | Criterio de Aceptación            | 2,0% | ACEPTADO |
| 0,04 %   | 0,04 % |                                   |      |          |

**Figura 59**

*Pinza amperimétrica – 200 A DC.*

| Tabla I. Resultados experimentales |                   |                |        |        |        |
|------------------------------------|-------------------|----------------|--------|--------|--------|
| Pruebas                            | Resultados en A   |                |        |        |        |
|                                    | Grupos (Técnicos) |                |        |        |        |
|                                    | T1                | T2             | T3     | T4     | T5     |
| Test 1                             | 198,13            | 198,14         | 198,14 | 198,15 | 198,14 |
| Test 2                             | 198,15            | 198,17         | 198,19 | 198,17 | 198,20 |
| Test 3                             | 198,17            | 198,12         | 198,15 | 198,18 | 198,16 |
| n = 3                              |                   | ρ = # grupos   |        |        | media  |
| p = 5                              |                   | N = # de datos |        |        | 198,16 |
| N = 15                             |                   |                |        |        |        |

| Tabla II. Cálculo de los cuadrados medios entre-grupos y dentro-grupos |                              |                        |                              |
|--|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Fuente de variación  | Suma de cuadrados (SS)       | Grados de Libertad (v) | Cuadrados medios (MS)        |
| Entre-grupos (B)   | S <sub>se</sub> = 1,2933E-03 | ve = 4                 | MSe = 3,2333E-04             |
| Dentro-grupos (W)  | SS <sub>d</sub> = 5,8000E-03 | vd = 10                | MS <sub>d</sub> = 5,8000E-04 |
| Total (T)  | SS <sub>t</sub> = 7,0933E-03 | vt = 14                |                              |

| Tabla III. Prueba de significancia estadística |                      |          |                            |
|--|----------------------|----------|----------------------------|
| F=MSe/MSd                                      | F <sub>0,05</sub>    | P-value  | Significancia Estadística? |
| F <sub>calculado</sub>                         | F <sub>crítico</sub> | α = 0,05 |                            |
| 0,56   | 3,48                 | 0,70     | No                         |

Los valores F calculado, F crítico y P permitirán extraer conclusiones sobre si hay una diferencia estadísticamente significativa entre-grupos. Para esto, se usa la prueba-F. Siendo *sd*, *se* y *st* las desviaciones estándares dentro-grupos, entre-grupos y total respectivamente.

*Fcalculado < Fcrítico, se concluye que no existen diferencias significativas entre grupos*

| Tabla IV. Cálculo de las varianzas dentro de los grupos (s <sup>2</sup> <sub>d</sub> ) y entre grupos (s <sup>2</sup> <sub>e</sub> ) |   |  |
|--|---|--|
| s <sub>d</sub> <sup>2</sup> = MS <sub>d</sub>  | s <sub>t</sub> <sup>2</sup> = s <sub>e</sub> <sup>2</sup> + s <sub>d</sub> <sup>2</sup> | s <sub>e</sub> <sup>2</sup> = (MS <sub>e</sub> - MS <sub>d</sub> ) / n |
|  |   | S <sub>e</sub> <sup>2</sup> = -8,556E-05                               |
| S <sub>d</sub> <sup>2</sup>  | S <sub>e</sub> <sup>2</sup>   | S <sub>t</sub> <sup>2</sup>  |
| 5,800E-04  | 0,000E+00   | 5,800E-04  |

Nota: Si el resultado de s<sub>e</sub><sup>2</sup> es negativo, se le asignara el valor de cero.

| Tabla V. Desvío estándar en condiciones de repetibilidad (S <sub>d</sub> ) y precisión intralaboratorio (S <sub>t</sub> ) |                |                |
|---|----------------|----------------|
| S <sub>d</sub>  | S <sub>e</sub> | S <sub>t</sub> |
| 2,408E-02   | 0,000E+00      | 2,408E-02      |

| Tabla VI. Cálculo de coeficientes de variación en condiciones de repetibilidad (CVR) y precisión intralaboratorio (CVWL) |        |                                   |      |          |
|--|--------|-----------------------------------|------|----------|
| CVR=(S <sub>d</sub> /media) x100   |        | CVWL=(S <sub>t</sub> /media) x100 |      |          |
| CVR  | CVWL   | Criterio de Aceptación            | 2,0% | ACEPTADO |
| 0,01 %   | 0,01 % |                                   |      |          |

**Figura 60**

*Pinza amperimétrica – 1000 A DC.*

| Tabla I. Resultados experimentales |                   |                |        |        |        |
|------------------------------------|-------------------|----------------|--------|--------|--------|
| Pruebas                            | Resultados en A   |                |        |        |        |
|                                    | Grupos (Técnicos) |                |        |        |        |
|                                    | T1                | T2             | T3     | T4     | T5     |
| Test 1                             | 998,83            | 998,82         | 998,82 | 999,78 | 997,79 |
| Test 2                             | 997,79            | 997,74         | 997,76 | 997,79 | 997,78 |
| Test 3                             | 997,77            | 997,76         | 997,77 | 997,81 | 997,81 |
| n = 3                              |                   | ρ = # grupos   |        |        | media  |
| p = 5                              |                   | N = # de datos |        |        | 998,12 |
| N = 15                             |                   |                |        |        |        |

| Tabla II. Cálculo de los cuadrados medios entre-grupos y dentro-grupos |                              |                        |                              |
|--|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Fuente de variación  | Suma de cuadrados (SS)       | Grados de Libertad (v) | Cuadrados medios (MS)        |
| Entre-grupos (B)   | S <sub>se</sub> = 6,6777E-01 | ve = 4                 | MSe = 1,6694E-01             |
| Dentro-grupos (W)  | SS <sub>d</sub> = 4,8550E+00 | vd = 10                | MS <sub>d</sub> = 4,8550E-01 |
| Total (T)  | SS <sub>t</sub> = 5,5228E+00 | vt = 14                |                              |

| Tabla III. Prueba de significancia estadística |                      |          |                            |
|--|----------------------|----------|----------------------------|
| F=MSe/MSd                                      | F <sub>0,05</sub>    | P-value  | Significancia Estadística? |
| F <sub>calculado</sub>                         | F <sub>crítico</sub> | α = 0.05 |                            |
| 0,34   | 3,48                 | 0,84     | No                         |

Los valores F calculado, F crítico y P permitirán extraer conclusiones sobre si hay una diferencia estadísticamente significativa entre-grupos. Para esto, se usa la prueba-F. Siendo *sd*, *se* y *st* las desviaciones estándares dentro-grupos, entre-grupos y total respectivamente.

*Fcalculado < Fcrítico, se concluye que no existen diferencias significativas entre grupos*

| Tabla IV. Cálculo de las varianzas dentro de los grupos (s <sup>2</sup> <sub>d</sub> ) y entre grupos (s <sup>2</sup> <sub>e</sub> ) |   |  |
|--|---|--|
| s <sub>d</sub> <sup>2</sup> = MS <sub>d</sub>  | s <sub>t</sub> <sup>2</sup> = s <sub>e</sub> <sup>2</sup> + s <sub>d</sub> <sup>2</sup> | s <sub>e</sub> <sup>2</sup> = (MS <sub>e</sub> - MS <sub>d</sub> ) / n |
|  |   | S <sub>e</sub> <sup>2</sup> = -1,062E-01                               |
| S <sub>d</sub> <sup>2</sup>  | S <sub>e</sub> <sup>2</sup>   | S <sub>t</sub> <sup>2</sup>  |
| 4,855E-01  | 0,000E+00   | 4,855E-01  |

| Tabla V. Desvío estándar en condiciones de repetibilidad (S <sub>d</sub> ) y precisión intralaboratorio (S <sub>t</sub> ) |                |                |
|---|----------------|----------------|
| S <sub>d</sub>  | S <sub>e</sub> | S <sub>t</sub> |
| 6,968E-01   | 0,000E+00      | 6,968E-01      |

| Tabla VI. Cálculo de coeficientes de variación en condiciones de repetibilidad (CVR) y precisión intralaboratorio (CVWL) |        |                                   |      |          |
|--|--------|-----------------------------------|------|----------|
| CVR=(S <sub>d</sub> /media) x100   |        | CVWL=(S <sub>t</sub> /media) x100 |      |          |
| CVR  | CVWL   | Criterio de Aceptación            | 2,0% | ACEPTADO |
| 0,07 %   | 0,07 % |                                   |      |          |

**Figura 61**

*Pinza amperimétrica – 3 mA AC.*

| Tabla I. Resultados experimentales |                   |                |      |      |       |
|------------------------------------|-------------------|----------------|------|------|-------|
| Pruebas                            | Resultados en mA  |                |      |      |       |
|                                    | Grupos (Técnicos) |                |      |      |       |
|                                    | T1                | T2             | T3   | T4   | T5    |
| Test 1                             | 3,02              | 3,02           | 3,03 | 3,01 | 3,02  |
| Test 2                             | 3,01              | 3,01           | 3,02 | 3,02 | 3,01  |
| Test 3                             | 3,02              | 3,02           | 3,02 | 3,03 | 3,02  |
| n = 3                              |                   | ρ = # grupos   |      |      | media |
| p = 5                              |                   | N = # de datos |      |      | 3,02  |
| N = 15                             |                   |                |      |      |       |

| Tabla II. Cálculo de los cuadrados medios entre-grupos y dentro-grupos |                        |                        |                       |
|--|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Fuente de variación  | Suma de cuadrados (SS) | Grados de Libertad (v) | Cuadrados medios (MS) |
| Entre-grupos (B)   | Sse = 1,0667E-04       | ve = 4                 | MSe = 2,6667E-05      |
| Dentro-grupos (W)  | SSd = 4,6667E-04       | vd = 10                | MSd = 4,6667E-05      |
| Total (T)  | SSt = 5,7333E-04       | vt = 14                |                       |

| Tabla III. Prueba de significancia estadística |                      |          |                            |
|--|----------------------|----------|----------------------------|
| F=MSe/MSd                                      | F <sub>0,05</sub>    | P-value  | Significancia Estadística? |
| F <sub>calculado</sub>                         | F <sub>crítico</sub> | α = 0,05 |                            |
| 0,57   | 3,48                 | 0,69     |                            |

Los valores Fcalculado, F crítico y P permitirán extraer conclusiones sobre si hay una diferencia estadísticamente significativa entre-grupos. Para esto, se usa la prueba-F. Siendo *sd*, *se* y *st* las desviaciones estándares dentro-grupos, entre-grupos y total respectivamente.

*Fcalculado < Fcrítico, se concluye que no existen diferencias significativas entre grupos*

| Tabla IV. Cálculo de las varianzas dentro de los grupos (s <sup>2</sup> <sub>d</sub> ) y entre grupos (s <sup>2</sup> <sub>e</sub> ) |                             |  |
|--|-----------------------------|--|
| $s_d^2 = MS_d$   | $s_t^2 = s_e^2 + s_d^2$     | $s_e^2 = (MS_e - MS_d) / n$              |
|  |                             | S <sup>2</sup> <sub>e</sub> = -6,667E-06 |
| S <sup>2</sup> <sub>d</sub>  | S <sup>2</sup> <sub>e</sub> | S <sup>2</sup> <sub>t</sub>              |
| 4,667E-05  | 0,000E+00                   | 4,667E-05                                |

Nota: Si el resultado de se<sup>2</sup> es negativo, se le asignara el valor de cero.

| Tabla V. Desvío estándar en condiciones de repetibilidad (Sd) y precisión intralaboratorio (St) |                |                |
|---|----------------|----------------|
| S <sub>d</sub>  | S <sub>e</sub> | S <sub>t</sub> |
| 6,831E-03   | 0,000E+00      | 6,831E-03      |

| Tabla VI. Cálculo de coeficientes de variación en condiciones de repetibilidad (CVR) y precisión intralaboratorio (CVWL) |        |                        |      |          |
|--|--------|------------------------|------|----------|
| CVR=(Sd/media) x100  |        | CVWL=(St/media) x100   |      |          |
| CVR  | CVWL   | Criterio de Aceptación | 2,0% | ACEPTADO |
| 0,23 %   | 0,23 % |                        |      |          |

**Figura 62**

*Pinza amperimétrica – 30 mA AC.*

| Tabla I. Resultados experimentales |                   |                |       |       |       |
|------------------------------------|-------------------|----------------|-------|-------|-------|
| Pruebas                            | Resultados en mA  |                |       |       |       |
|                                    | Grupos (Técnicos) |                |       |       |       |
|                                    | T1                | T2             | T3    | T4    | T5    |
| Test 1                             | 30,12             | 30,12          | 30,12 | 30,10 | 30,10 |
| Test 2                             | 30,10             | 30,10          | 30,11 | 30,11 | 30,10 |
| Test 3                             | 30,10             | 30,12          | 30,10 | 30,12 | 30,11 |
| n = 3                              |                   | ρ = # grupos   |       |       | media |
| p = 5                              |                   | N = # de datos |       |       | 30,11 |
| N = 15                             |                   |                |       |       |       |

| Tabla II. Cálculo de los cuadrados medios entre-grupos y dentro-grupos |                        |                        |                       |
|--|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Fuente de variación  | Suma de cuadrados (SS) | Grados de Libertad (v) | Cuadrados medios (MS) |
| Entre-grupos (B)   | Sse = 1,7333E-04       | ve = 4                 | MSe = 4,3333E-05      |
| Dentro-grupos (W)  | SSd = 1,0000E-03       | vd = 10                | MSd = 1,0000E-04      |
| Total (T)  | SSt = 1,1733E-03       | vt = 14                |                       |

| Tabla III. Prueba de significancia estadística |                      |          |                            |
|--|----------------------|----------|----------------------------|
| F=MSe/MSd                                      | F <sub>0,05</sub>    | P-value  | Significancia Estadística? |
| F <sub>calculado</sub>                         | F <sub>crítico</sub> | α = 0,05 |                            |
| 0,43   | 3,48                 | 0,78     | No                         |

Los valores F calculado, F crítico y P permitirán extraer conclusiones sobre si hay una diferencia estadísticamente significativa entre-grupos. Para esto, se usa la prueba-F. Siendo *sd*, *se* y *st* las desviaciones estándares dentro-grupos, entre-grupos y total respectivamente.

*Fcalculado < Fcrítico, se concluye que no existen diferencias significativas entre grupos*

| Tabla IV. Cálculo de las varianzas dentro de los grupos (s <sup>2</sup> <sub>d</sub> ) y entre grupos (s <sup>2</sup> <sub>e</sub> ) |   |  |
|--|---|--|
| s <sub>d</sub> <sup>2</sup> = MS <sub>d</sub>  | s <sub>t</sub> <sup>2</sup> = s <sub>e</sub> <sup>2</sup> + s <sub>d</sub> <sup>2</sup> | s <sub>e</sub> <sup>2</sup> = (MS <sub>e</sub> - MS <sub>d</sub> ) / n |
|  |   | S <sub>e</sub> <sup>2</sup> = -1,889E-05                               |
| S <sub>d</sub> <sup>2</sup>  | S <sub>e</sub> <sup>2</sup>   | S <sub>t</sub> <sup>2</sup>  |
| 1,000E-04  | 0,000E+00   | 1,000E-04  |

Nota: Si el resultado de se<sup>2</sup> es negativo, se le asignara el valor de cero.

| Tabla V. Desvío estándar en condiciones de repetibilidad (S <sub>d</sub> ) y precisión intralaboratorio (S <sub>t</sub> ) |                |                |
|---|----------------|----------------|
| S <sub>d</sub>  | S <sub>e</sub> | S <sub>t</sub> |
| 1,000E-02   | 0,000E+00      | 1,000E-02      |

| Tabla VI. Cálculo de coeficientes de variación en condiciones de repetibilidad (CVR) y precisión intralaboratorio (CVWL) |        |                                   |      |          |
|--|--------|-----------------------------------|------|----------|
| CVR=(S <sub>d</sub> /media) x100   |        | CVWL=(S <sub>t</sub> /media) x100 |      |          |
| CVR  | CVWL   | Criterio de Aceptación            | 2,0% | ACEPTADO |
| 0,03 %   | 0,03 % |                                   |      |          |

**Figura 63**

*Pinza amperimétrica – 300 mA AC.*

| Tabla I. Resultados experimentales |                   |                |       |       |       |
|------------------------------------|-------------------|----------------|-------|-------|-------|
| Pruebas                            | Resultados en mA  |                |       |       |       |
|                                    | Grupos (Técnicos) |                |       |       |       |
|                                    | T1                | T2             | T3    | T4    | T5    |
| Test 1                             | 299,8             | 299,7          | 299,7 | 299,7 | 299,8 |
| Test 2                             | 299,8             | 299,5          | 299,5 | 299,6 | 299,7 |
| Test 3                             | 299,7             | 299,7          | 299,3 | 299,7 | 299,6 |
| n = 3                              |                   | ρ = # grupos   |       |       | media |
| p = 5                              |                   | N = # de datos |       |       | 299,7 |
| N = 15                             |                   |                |       |       |       |

| Tabla II. Cálculo de los cuadrados medios entre-grupos y dentro-grupos |                              |                        |                              |
|--|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Fuente de variación  | Suma de cuadrados (SS)       | Grados de Libertad (v) | Cuadrados medios (MS)        |
| Entre-grupos (B)   | S <sub>se</sub> = 1,1733E-01 | ve = 4                 | MSe = 2,9333E-02             |
| Dentro-grupos (W)  | SS <sub>d</sub> = 1,4000E-01 | vd = 10                | MS <sub>d</sub> = 1,4000E-02 |
| Total (T)  | SS <sub>t</sub> = 2,5733E-01 | vt = 14                |                              |

| Tabla III. Prueba de significancia estadística |                      |          |                            |
|--|----------------------|----------|----------------------------|
| F=MSe/MSd                                      | F <sub>0,05</sub>    | P-value  | Significancia Estadística? |
| F <sub>calculado</sub>                         | F <sub>crítico</sub> | α = 0,05 |                            |
| 2,10   | 3,48                 | 0,16     |                            |

Los valores F calculado, F crítico y P permitirán extraer conclusiones sobre si hay una diferencia estadísticamente significativa entre-grupos. Para esto, se usa la prueba-F. Siendo *sd*, *se* y *st* las desviaciones estándares dentro-grupos, entre-grupos y total respectivamente.

*Fcalculado < Fcrítico, se concluye que no existen diferencias significativas entre grupos*

| Tabla IV. Cálculo de las varianzas dentro de los grupos (s <sup>2</sup> <sub>d</sub> ) y entre grupos (s <sup>2</sup> <sub>e</sub> ) |   |  |           |
|--|---|--|-----------|
| s <sub>d</sub> <sup>2</sup> = MS <sub>d</sub>  | s <sub>t</sub> <sup>2</sup> = s <sub>e</sub> <sup>2</sup> + s <sub>d</sub> <sup>2</sup> | s <sub>e</sub> <sup>2</sup> = (MS <sub>e</sub> - MS <sub>d</sub> ) / n |           |
|  |   | S <sub>e</sub> <sup>2</sup> =  | 5,111E-03 |
| S <sub>d</sub> <sup>2</sup>  | S <sub>e</sub> <sup>2</sup>   | S <sub>t</sub> <sup>2</sup>  |           |
| 1,400E-02  | 5,111E-03   | 1,911E-02  |           |

Nota: Si el resultado de se<sup>2</sup> es negativo, se le asignara el valor de cero.

| Tabla V. Desvío estándar en condiciones de repetibilidad (S <sub>d</sub> ) y precisión intralaboratorio (S <sub>t</sub> ) |                |                |
|---|----------------|----------------|
| S <sub>d</sub>  | S <sub>e</sub> | S <sub>t</sub> |
| 1,183E-01   | 7,149E-02      | 1,382E-01      |

| Tabla VI. Cálculo de coeficientes de variación en condiciones de repetibilidad (CVR) y precisión intralaboratorio (CVWL) |        |                                   |      |          |
|--|--------|-----------------------------------|------|----------|
| CVR=(S <sub>d</sub> /media) x100   |        | CVWL=(S <sub>t</sub> /media) x100 |      |          |
| CVR  | CVWL   | Criterio de Aceptación            | 2,0% | ACEPTADO |
| 0,04 %   | 0,05 % |                                   |      |          |

**Figura 64**

*Pinza amperimétrica – 20 A AC.*

| Tabla I. Resultados experimentales |                   |                |       |       |       |
|------------------------------------|-------------------|----------------|-------|-------|-------|
| Pruebas                            | Resultados en A   |                |       |       |       |
|                                    | Grupos (Técnicos) |                |       |       |       |
|                                    | T1                | T2             | T3    | T4    | T5    |
| Test 1                             | 18,53             | 18,54          | 18,53 | 18,56 | 18,54 |
| Test 2                             | 18,54             | 18,56          | 18,54 | 18,53 | 18,53 |
| Test 3                             | 18,56             | 18,54          | 18,54 | 18,54 | 18,53 |
| n = 3                              |                   | p = # grupos   |       |       | media |
| p = 5                              |                   | N = # de datos |       |       | 18,54 |
| N = 15                             |                   |                |       |       |       |

| Tabla II. Cálculo de los cuadrados medios entre-grupos y dentro-grupos |                              |                        |                              |
|--|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Fuente de variación  | Suma de cuadrados (SS)       | Grados de Libertad (v) | Cuadrados medios (MS)        |
| Entre-grupos (B)   | S <sub>se</sub> = 3,6000E-04 | ve = 4                 | MSe = 9,0000E-05             |
| Dentro-grupos (W)  | SS <sub>d</sub> = 1,3333E-03 | vd = 10                | MS <sub>d</sub> = 1,3333E-04 |
| Total (T)  | SS <sub>t</sub> = 1,6933E-03 | vt = 14                |                              |

| Tabla III. Prueba de significancia estadística |                      |          |                            |
|--|----------------------|----------|----------------------------|
| F=MSe/MSd                                      | F <sub>0,05</sub>    | P-value  | Significancia Estadística? |
| F <sub>calculado</sub>                         | F <sub>crítico</sub> | α = 0.05 |                            |
| 0,68   | 3,48                 | 0,62     | No                         |

Los valores F calculado, F crítico y P permitirán extraer conclusiones sobre si hay una diferencia estadísticamente significativa entre-grupos. Para esto, se usa la prueba-F. Siendo *sd*, *se* y *st* las desviaciones estándares dentro-grupos, entre-grupos y total respectivamente.

*Fcalculado < Fcrítico, se concluye que no existen diferencias significativas entre grupos*

| Tabla IV. Cálculo de las varianzas dentro de los grupos (s <sup>2</sup> <sub>d</sub> ) y entre grupos (s <sup>2</sup> <sub>e</sub> ) |   |  |
|--|---|--|
| s <sub>d</sub> <sup>2</sup> = MS <sub>d</sub>  | s <sub>t</sub> <sup>2</sup> = s <sub>e</sub> <sup>2</sup> + s <sub>d</sub> <sup>2</sup> | s <sub>e</sub> <sup>2</sup> = (MS <sub>e</sub> - MS <sub>d</sub> ) / n |
|  |   | S <sub>e</sub> <sup>2</sup> = -1,444E-05                               |
| S <sub>d</sub> <sup>2</sup>  | S <sub>e</sub> <sup>2</sup>   | S <sub>t</sub> <sup>2</sup>  |
| 1,333E-04  | 0,000E+00   | 1,333E-04  |

Nota: Si el resultado de s<sub>e</sub><sup>2</sup> es negativo, se le asignara el valor de cero.

| Tabla V. Desvío estándar en condiciones de repetibilidad (S <sub>d</sub> ) y precisión intralaboratorio (S <sub>t</sub> ) |                |                |
|---|----------------|----------------|
| S <sub>d</sub>  | S <sub>e</sub> | S <sub>t</sub> |
| 1,155E-02   | 0,000E+00      | 1,155E-02      |

| Tabla VI. Cálculo de coeficientes de variación en condiciones de repetibilidad (CVR) y precisión intralaboratorio (CVWL) |        |                                   |      |          |
|--|--------|-----------------------------------|------|----------|
| CVR=(S <sub>d</sub> /media) x100   |        | CVWL=(S <sub>t</sub> /media) x100 |      |          |
| CVR  | CVWL   | Criterio de Aceptación            | 2,0% | ACEPTADO |
| 0,06 %   | 0,06 % |                                   |      |          |

**Figura 65**

*Pinza amperimétrica – 500 A AC.*

| Tabla I. Resultados experimentales |                   |                |        |        |        |
|------------------------------------|-------------------|----------------|--------|--------|--------|
| Pruebas                            | Resultados en A   |                |        |        |        |
|                                    | Grupos (Técnicos) |                |        |        |        |
|                                    | T1                | T2             | T3     | T4     | T5     |
| Test 1                             | 497,28            | 497,26         | 497,27 | 497,27 | 497,26 |
| Test 2                             | 497,26            | 497,27         | 498,06 | 498,05 | 498,08 |
| Test 3                             | 497,27            | 497,28         | 497,28 | 497,26 | 497,26 |
| n = 3                              |                   | ρ = # grupos   |        |        | media  |
| p = 5                              |                   | N = # de datos |        |        | 497,43 |
| N = 15                             |                   |                |        |        |        |

| Tabla II. Cálculo de los cuadrados medios entre-grupos y dentro-grupos |                              |                        |                              |
|--|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Fuente de variación  | Suma de cuadrados (SS)       | Grados de Libertad (v) | Cuadrados medios (MS)        |
| Entre-grupos (B)   | S <sub>se</sub> = 2,4769E-01 | ve = 4                 | MSe = 6,1923E-02             |
| Dentro-grupos (W)  | SS <sub>d</sub> = 1,2704E+00 | vd = 10                | MS <sub>d</sub> = 1,2704E-01 |
| Total (T)  | SS <sub>t</sub> = 1,5181E+00 | vt = 14                |                              |

| Tabla III. Prueba de significancia estadística |                      |          |                            |
|--|----------------------|----------|----------------------------|
| F=MSe/MSd                                      | F <sub>0,05</sub>    | P-value  | Significancia Estadística? |
| F <sub>calculado</sub>                         | F <sub>crítico</sub> | α = 0.05 |                            |
| 0,49   | 3,48                 | 0,75     | No                         |

Los valores F calculado, F crítico y P permitirán extraer conclusiones sobre si hay una diferencia estadísticamente significativa entre-grupos. Para esto, se usa la prueba-F. Siendo *sd*, *se* y *st* las desviaciones estándares dentro-grupos, entre-grupos y total respectivamente.

*Fcalculado < Fcrítico, se concluye que no existen diferencias significativas entre grupos*

| Tabla IV. Cálculo de las varianzas dentro de los grupos (s <sup>2</sup> <sub>d</sub> ) y entre grupos (s <sup>2</sup> <sub>e</sub> ) |   |  |
|--|---|--|
| s <sub>d</sub> <sup>2</sup> = MS <sub>d</sub>  | s <sub>t</sub> <sup>2</sup> = s <sub>e</sub> <sup>2</sup> + s <sub>d</sub> <sup>2</sup> | s <sub>e</sub> <sup>2</sup> = (MS <sub>e</sub> - MS <sub>d</sub> ) / n |
|  |   | S <sub>e</sub> <sup>2</sup> = -2,171E-02                               |
| S <sub>d</sub> <sup>2</sup>  | S <sub>e</sub> <sup>2</sup>   | S <sub>t</sub> <sup>2</sup>  |
| 1,270E-01  | 0,000E+00   | 1,270E-01  |

Nota: Si el resultado de se<sup>2</sup> es negativo, se le asignara el valor de cero.

| Tabla V. Desvío estándar en condiciones de repetibilidad (S <sub>d</sub> ) y precisión intralaboratorio (S <sub>t</sub> ) |                |                |
|---|----------------|----------------|
| S <sub>d</sub>  | S <sub>e</sub> | S <sub>t</sub> |
| 3,564E-01   | 0,000E+00      | 3,564E-01      |

| Tabla VI. Cálculo de coeficientes de variación en condiciones de repetibilidad (CVR) y precisión intralaboratorio (CVWL) |        |                                   |      |          |
|--|--------|-----------------------------------|------|----------|
| CVR=(S <sub>d</sub> /media) x100   |        | CVWL=(S <sub>t</sub> /media) x100 |      |          |
| CVR  | CVWL   | Criterio de Aceptación            | 2,0% | ACEPTADO |
| 0,07 %   | 0,07 % |                                   |      |          |

**Figura 66**

*Pinza amperimétrica – 1000 A AC.*

| Tabla I. Resultados experimentales |                   |                |       |       |       |
|------------------------------------|-------------------|----------------|-------|-------|-------|
| Pruebas                            | Resultados en A   |                |       |       |       |
|                                    | Grupos (Técnicos) |                |       |       |       |
|                                    | T1                | T2             | T3    | T4    | T5    |
| Test 1                             | 996,6             | 996,6          | 997,1 | 997,1 | 996,6 |
| Test 2                             | 996,6             | 996,6          | 996,6 | 996,6 | 996,6 |
| Test 3                             | 996,6             | 996,6          | 996,6 | 996,6 | 996,6 |
| n = 3                              |                   | ρ = # grupos   |       |       | media |
| p = 5                              |                   | N = # de datos |       |       | 996,7 |
| N = 15                             |                   |                |       |       |       |

| Tabla II. Cálculo de los cuadrados medios entre-grupos y dentro-grupos |                              |                        |                              |
|--|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Fuente de variación  | Suma de cuadrados (SS)       | Grados de Libertad (v) | Cuadrados medios (MS)        |
| Entre-grupos (B)   | S <sub>se</sub> = 9,6173E-02 | ve = 4                 | MSe = 2,4043E-02             |
| Dentro-grupos (W)  | SS <sub>d</sub> = 3,2480E-01 | vd = 10                | MS <sub>d</sub> = 3,2480E-02 |
| Total (T)  | SS <sub>t</sub> = 4,2097E-01 | vt = 14                |                              |

| Tabla III. Prueba de significancia estadística |                      |          |                            |
|--|----------------------|----------|----------------------------|
| F=MSe/MSd                                      | F <sub>0,05</sub>    | P-value  | Significancia Estadística? |
| F <sub>calculado</sub>                         | F <sub>crítico</sub> | α = 0.05 |                            |
| 0,74   | 3,48                 | 0,59     | No                         |

Los valores F calculado, F crítico y P permitirán extraer conclusiones sobre si hay una diferencia estadísticamente significativa entre-grupos. Para esto, se usa la prueba-F. Siendo *sd*, *se* y *st* las desviaciones estándares dentro-grupos, entre-grupos y total respectivamente.

*Fcalculado < Fcrítico, se concluye que no existen diferencias significativas entre grupos*

| Tabla IV. Cálculo de las varianzas dentro de los grupos (s <sup>2</sup> <sub>d</sub> ) y entre grupos (s <sup>2</sup> <sub>e</sub> ) |                             |  |
|--|-----------------------------|--|
| $s_d^2 = MS_d$   | $s_t^2 = s_e^2 + s_d^2$     | $s_e^2 = (MS_e - MS_d) / n$              |
|  |                             | S <sup>2</sup> <sub>e</sub> = -2,812E-03 |
| S <sup>2</sup> <sub>d</sub>  | S <sup>2</sup> <sub>e</sub> | S <sup>2</sup> <sub>t</sub>              |
| 3,248E-02  | 0,000E+00                   | 3,248E-02                                |

Nota: Si el resultado de se<sup>2</sup> es negativo, se le asignara el valor de cero.

| Tabla V. Desvío estándar en condiciones de repetibilidad (S <sub>d</sub> ) y precisión intralaboratorio (S <sub>t</sub> ) |                |                |
|---|----------------|----------------|
| S <sub>d</sub>  | S <sub>e</sub> | S <sub>t</sub> |
| 1,802E-01   | 0,000E+00      | 1,802E-01      |

| Tabla VI. Cálculo de coeficientes de variación en condiciones de repetibilidad (CVR) y precisión intralaboratorio (CVWL) |        |                                   |      |          |
|--|--------|-----------------------------------|------|----------|
| CVR=(S <sub>d</sub> /media) x100   |        | CVWL=(S <sub>t</sub> /media) x100 |      |          |
| CVR  | CVWL   | Criterio de Aceptación            | 2,0% | ACEPTADO |
| 0,02 %   | 0,02 % |                                   |      |          |

### 3.3.5. Resultados del desempeño del laboratorio

Los resultados se muestran en la tabla 22. Para mantener la confidencialidad de los participantes se identificó a los laboratorios de manera aleatoria mediante el uso de un código el cual fue informado a cada uno mediante una carta oficial para los fines que se crea conveniente. El laboratorio de calibración materia de estudio tuvo asignado el código LAB9.

**Tabla 22**

*Resultados de error e incertidumbre para los distintos valores de corriente.*

| LABORATORIO   | 37,8 A – 60 Hz |               | 378 A – 60 Hz |               | 900 A - 60 Hz |               |
|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|               | Error          | U<br>(k=2,00) | Error         | U<br>(k=2,00) | Error         | U<br>(k=2,00) |
|               | A              | A             | A             | A             | A             | A             |
| <b>INACAL</b> | <b>0,12</b>    | <b>0,11</b>   | <b>1,1</b>    | <b>1,0</b>    | <b>7</b>      | <b>2,0</b>    |
| LAB1          | 0,04           | 0,11          | 0,4           | 1,0           | 5             | 2,0           |
| LAB2          | 0,11           | 0,14          | 1             | 1,1           | 7             | 3,0           |
| LAB3          | 0,07           | 0,12          | 0,7           | 1,1           | 7             | 2,0           |
| LAB4          | 0,09           | 0,19          | 0,9           | 1,6           | *NP           | *NP           |
| LAB5          | 0,6            | 0,50          | 5,4           | 3,1           | 17            | 6,0           |
| LAB6          | 0,18           | 0,27          | 1,7           | 2,1           | 6             | 5,0           |
| LAB7          | 0,07           | 0,16          | 0,7           | 1,2           | 7             | 3,0           |
| LAB8          | 0,06           | 0,10          | 0,4           | 1,0           | 5             | 2,0           |
| <b>LAB9</b>   | <b>0,15</b>    | <b>0,21</b>   | <b>0,7</b>    | <b>1,4</b>    | <b>7</b>      | <b>3,0</b>    |

*Nota.* (\*) NP: No Presento. Elaboración propia en base a la tabla extraída del informe final de la evaluación de desempeño DM-LE-07. Fuente: Laboratorio de electricidad de la dirección de metrología del INACAL (2018).

Utilizando los resultados de la tabla 22, se procedió a separar cada uno de los valores de corriente nominal para luego hallar el valor del error normalizado y determinar si es satisfactorio. Para que se pueda visualizar de manera más didáctica, por cada tabla de resultados se elaboró una gráfica que muestra el error junto con la incertidumbre de medición.

**Tabla 23**

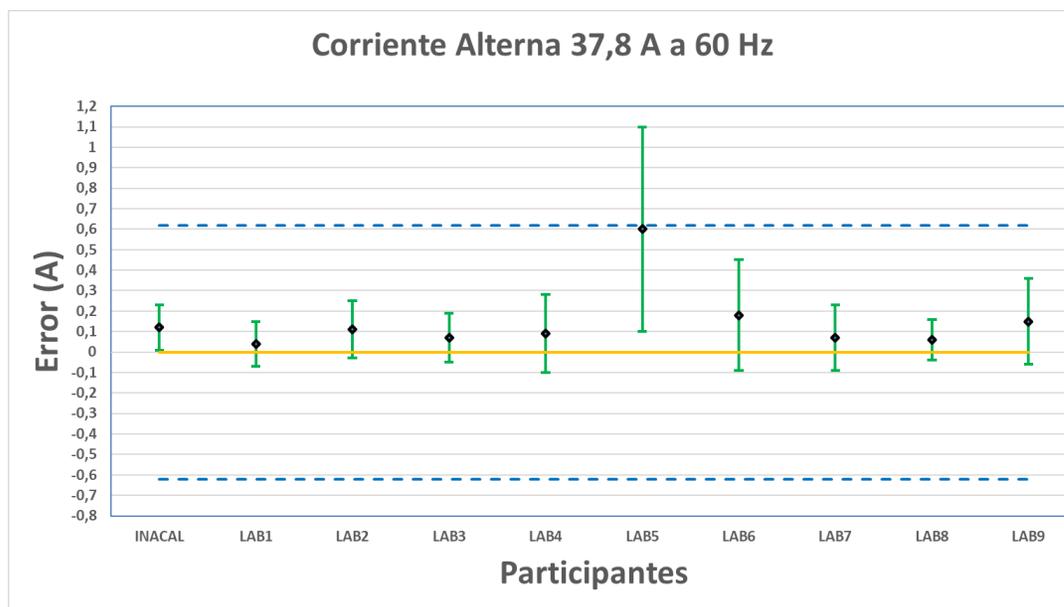
*Declaración de satisfacción de resultados para el valor de Corriente 37,8 A a 60 Hz.*

| LABORATORIO   | Error<br>A  | U<br>(k=2,00)<br>A | EN         | ¿Satisfactorio? |
|---------------|-------------|--------------------|------------|-----------------|
| <b>INACAL</b> | <b>0,12</b> | <b>0,11</b>        |            |                 |
| LAB1          | 0,04        | 0,11               | 0,5        | SÍ              |
| LAB2          | 0,11        | 0,14               | 0,1        | SÍ              |
| LAB3          | 0,07        | 0,12               | 0,3        | SÍ              |
| LAB4          | 0,09        | 0,19               | 0,1        | SÍ              |
| LAB5          | 0,6         | 0,50               | 0,9        | SÍ              |
| LAB6          | 0,18        | 0,27               | 0,2        | SÍ              |
| LAB7          | 0,07        | 0,16               | 0,3        | SÍ              |
| LAB8          | 0,06        | 0,10               | 0,4        | SÍ              |
| <b>LAB9</b>   | <b>0,15</b> | <b>0,21</b>        | <b>0,1</b> | <b>SÍ</b>       |

*Nota.* Elaboración propia en base a la tabla extraída del informe final de la evaluación de desempeño DM-LE-07. Fuente: Laboratorio de electricidad de la dirección de metrología del INACAL (2018).

**Figura 67**

*Sesgo de los laboratorios para el punto de calibración de 37,8 A a 60 Hz.*



*Nota.* Elaboración propia en base a la gráfica extraída del informe final de la evaluación de desempeño DM-LE-07. Fuente: Laboratorio de electricidad de la dirección de metrología del INACAL (2018).

**Tabla 24**

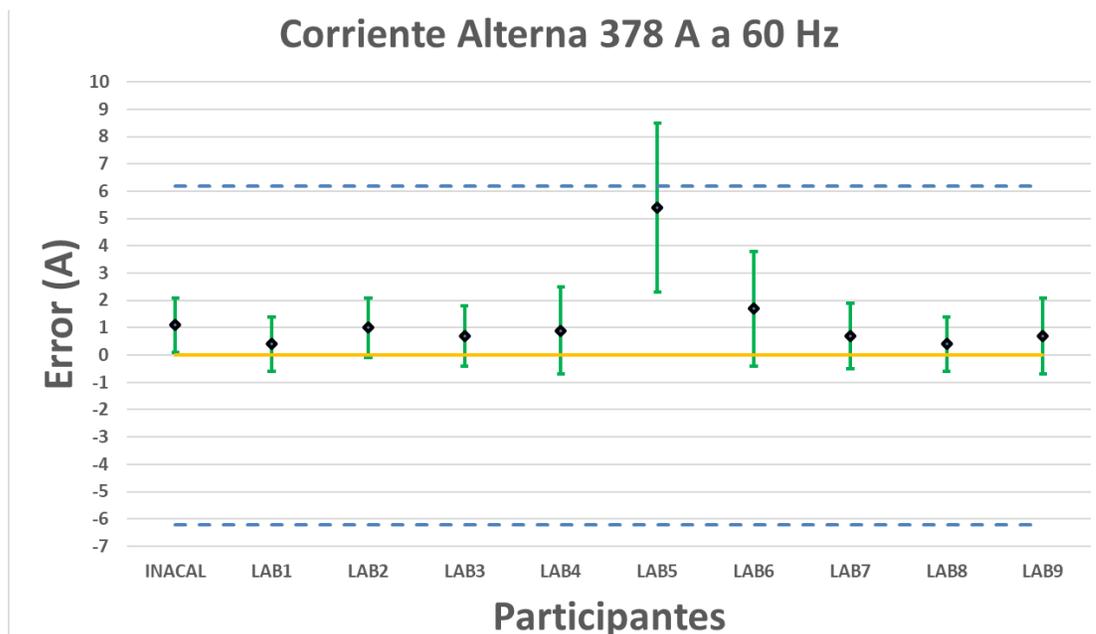
*Declaración de satisfacción de resultados para el valor de Corriente 378 A a 60 Hz.*

| LABORATORIO   | Error<br>A | U<br>(k=2,00)<br>A | EN         | ¿Satisfactorio? |
|---------------|------------|--------------------|------------|-----------------|
| <b>INACAL</b> | <b>1,1</b> | <b>1,0</b>         |            |                 |
| LAB1          | 0,4        | 1,0                | 0,5        | SÍ              |
| LAB2          | 1          | 1,1                | 0,1        | SÍ              |
| LAB3          | 0,7        | 1,1                | 0,3        | SÍ              |
| LAB4          | 0,9        | 1,6                | 0,1        | SÍ              |
| LAB5          | 5,4        | 3,1                | 1,3        | NO              |
| LAB6          | 1,7        | 2,1                | 0,3        | SÍ              |
| LAB7          | 0,7        | 1,2                | 0,3        | SÍ              |
| LAB8          | 0,4        | 1,0                | 0,5        | SÍ              |
| <b>LAB9</b>   | <b>0,7</b> | <b>1,4</b>         | <b>0,2</b> | <b>SÍ</b>       |

*Nota.* Elaboración propia en base a la tabla extraída del informe final de la evaluación de desempeño DM-LE-07. Fuente: Laboratorio de electricidad de la dirección de metrología del INACAL (2018).

**Figura 68**

*Sego de los laboratorios para el punto de calibración de 378 A a 60 Hz.*



*Nota.* Elaboración propia en base a la gráfica extraída del informe final de la evaluación de desempeño DM-LE-07. Fuente: Laboratorio de electricidad de la dirección de metrología del INACAL (2018).

**Tabla 25**

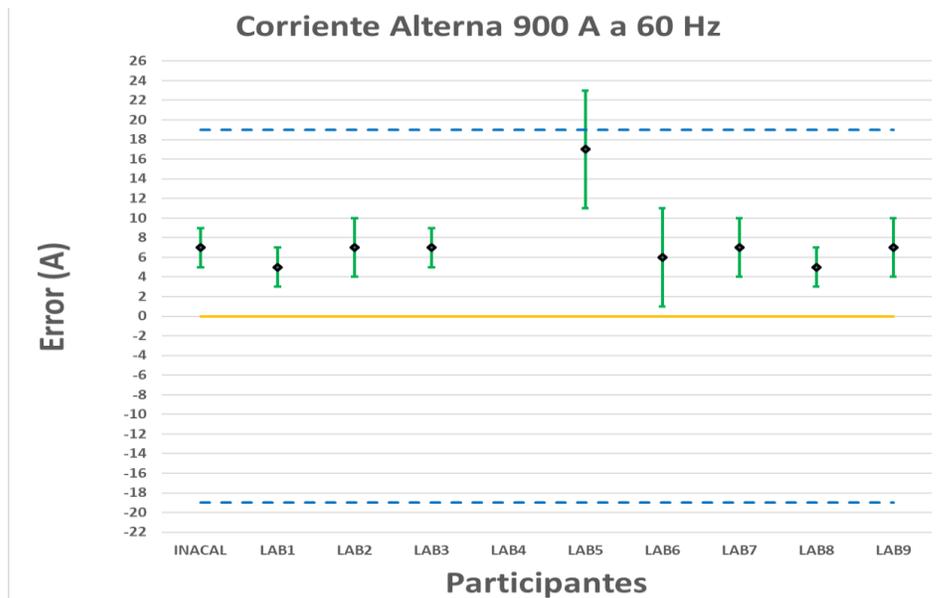
*Declaración de satisfacción de resultados para el valor de Corriente 900 A a 60 Hz.*

| LABORATORIO   | Error    | U<br>(k=2,00) | EN         | ¿Satisfactorio? |
|---------------|----------|---------------|------------|-----------------|
|               | A        | A             |            |                 |
| <b>INACAL</b> | <b>7</b> | <b>2,0</b>    |            |                 |
| LAB1          | 5        | 2,0           | 0,7        | SÍ              |
| LAB2          | 7        | 3,0           | 0,0        | SÍ              |
| LAB3          | 7        | 2,0           | 0,0        | SÍ              |
| LAB4          | NP       | NP            | ---        | ---             |
| LAB5          | 17       | 6,0           | 1,6        | NO              |
| LAB6          | 6        | 5,0           | 0,2        | SÍ              |
| LAB7          | 7        | 3,0           | 0,0        | SÍ              |
| LAB8          | 5        | 2,0           | 0,7        | SÍ              |
| <b>LAB9</b>   | <b>7</b> | <b>3,0</b>    | <b>0,0</b> | <b>SÍ</b>       |

*Nota.* Elaboración propia en base a la gráfica extraída del informe final de la evaluación de desempeño DM-LE-07. Fuente: Laboratorio de electricidad de la dirección de metrología del INACAL (2018).

**Figura 69**

*Sesgo de los laboratorios para el punto de calibración de 900 A a 60 Hz.*



*Nota.* Elaboración propia en base a la gráfica extraída del informe final de la evaluación de desempeño DM-LE-07. Fuente: Laboratorio de electricidad de la dirección de metrología del INACAL (2018).

## IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. Validación de hoja de cálculo

Según el apartado 4.3.1 del presente trabajo de investigación, se evidencia que los resultados obtenidos en el software MATLAB, son los mismos que muestra en la hoja de cálculo. Para tener fiabilidad de que la hoja de cálculo entrega resultados correctos, se realizó la validación en 3 puntos de corriente, tanto para corriente continua como para corriente alterna.

Por ejemplo, de la figura 37, se eligió el valor de 200 A para realizar la comparación. Se evidencia que, para ese valor nominal, el error es -0,20 A con una incertidumbre de 0,74 A, comparándolo con el resultado de la figura 38, el cual se realizó en MATLAB se tiene que el error es de -0,202 A con incertidumbre de 0,74433 A, teniendo en consideración que la incertidumbre de medición debe redondearse a 2 cifras significativas y que el error de medición debe redondearse con el mismo número de decimales que la incertidumbre, los resultados son los mismos.

De esta forma se evidencia de manera objetiva y documentada que la hoja de cálculo implementada, brinda un alto nivel de seguridad y fiabilidad para registrar y procesar los datos de manera eficiente, cumpliendo con todo lo indicado en el procedimiento de calibración de pinzas amperimétricas. La tabla 26 muestra el nivel de porcentaje de exactitud de los resultados obtenidas con Excel y Matlab.

**Tabla 26**

*Comparación entre los resultados en Excel y Matlab.*

| <b>Incertidumbre<br/>Excel<br/>Corriente AC</b> | <b>Incertidumbre<br/>Matlab<br/>Corriente AC</b> | <b>(Excel/Matlab) %</b> |
|---|--|-------------------------|
| 0,7443 A  | 0,7443 A   | 100 %                   |
| 1,6957 A  | 1,6957 A   | 100 %                   |
| 3,2853 A  | 3,2853 A   | 100 %                   |
| <b>Incertidumbre<br/>Excel<br/>Corriente DC</b> | <b>Incertidumbre<br/>Matlab<br/>Corriente DC</b> | <b>(Excel/Matlab) %</b> |
| 1,5745 A  | 1,5745 A   | 100 %                   |
| 3,174 A   | 3,174 A  | 100 %                   |
| 5,8401 A  | 5,8401 A   | 100 %                   |

## 4.2. Capacidad de medición y calibración (CMC)

Para comprender los resultados de la nueva CMC, se realizó una comparación entre la CMC 1 con la que contaba el laboratorio materia de estudio (ver tabla 2) frente a la última CMC 2 obtenida en el desarrollo de este trabajo de investigación (ver figura 42).

**Tabla 27**

*Comparación entre la CMC 1 y la CMC 2 para corriente alterna.*

| Rango           | CMC 1         | Ecuación           | Valor nominal | CMC2            |
|-----------------|---------------|--------------------|---------------|-----------------|
| Up to 100 A     | <b>0,41 A</b> | 1,0 mA/A + 0,67 mA | 0,3 A         | <b>0,0010 A</b> |
|                 |               | 1,0 mA/A + 4,5 mA  | 20 A          | <b>0,025 A</b>  |
|                 |               | 3,2 mA/A + 72 mA   | 50 A          | <b>0,23 A</b>   |
|                 |               | 3,3 mA/A + 93 mA   | 100 A         | <b>0,43 A</b>   |
| >(100 a 300) A  | <b>1,1 A</b>  | 3,3 mA/A + 93 mA   | 200 A         | <b>0,74 A</b>   |
|                 |               |                    | 300 A         | <b>1,1 A</b>    |
| >(300 a 500) A  | <b>1,7 A</b>  | 3,3 mA/A + 93 mA   | 400 A         | <b>1,4 A</b>    |
|                 |               |                    | 500 A         | <b>1,7 A</b>    |
| >(500 a 700) A  | <b>2,3 A</b>  | 3,2 mA/A + 100 mA  | 600 A         | <b>2,0 A</b>    |
|                 |               |                    | 700 A         | <b>2,3 A</b>    |
| >(700 a 1000) A | <b>3,0 A</b>  | 3,2 mA/A + 100 mA  | 800 A         | <b>2,6 A</b>    |
|                 |               |                    | 1000 A        | <b>3,3 A</b>    |

Tal como muestra la tabla 27, la principal diferencia entre las CMC radica en la presentación de los intervalos para determinar la incertidumbre de un valor nominal.

En la CMC 1 se muestran diferentes rangos como por ejemplo el rango de > (100 a 300) A el cual tiene un único valor de incertidumbre cuyo valor es de 1,1 A. Esto significa que dentro de ese intervalo de medida el valor más bajo de incertidumbre que se puede obtener es el de 1,1 A. El inconveniente es que no se conoce cuál sería la incertidumbre para valores como 200 A, 220 A, 250 A, por ejemplo.

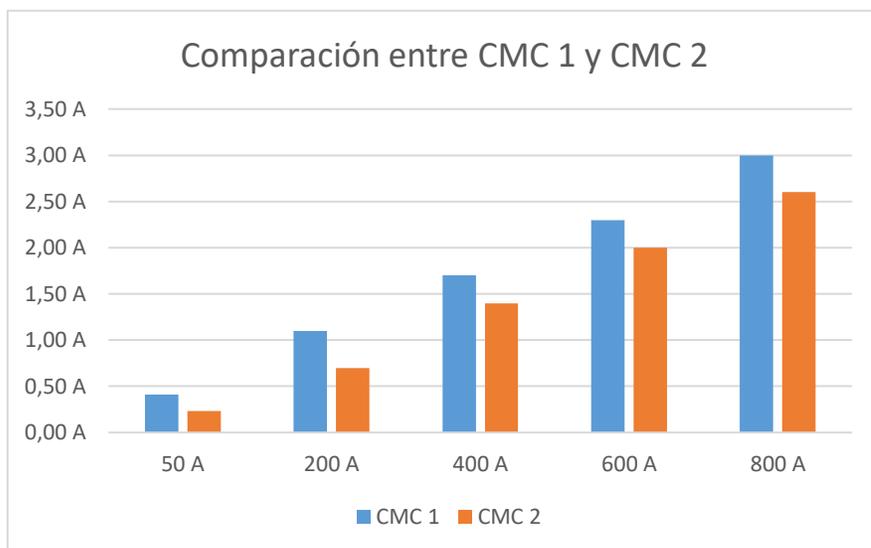
Distinta es la situación con la CMC 2, donde se muestra una ecuación que permite hallar el valor de incertidumbre al colocar cualquier valor nominal (obviamente en el intervalo que le corresponde a esa ecuación). La CMC 2 permite conocer el valor de incertidumbre tan solo con reemplazar el valor nominal en la ecuación. Por ejemplo, para el valor nominal de 200 A la incertidumbre es 0,74 A, el cual es incluso una menor incertidumbre que el del CMC1.

Para evidenciar si existe una mejora en la nueva CMC se realizó una comparación entre los resultados obtenidos y los que tenía el laboratorio antes de la implementación del nuevo procedimiento de calibración de pinza amperimétricas.

**Figura 70**

*Reducción de la CMC 1.*

| Nominal | CMC 1  | CMC 2  | Reducción de CMC 1<br>[(CM2/CMC1)-1 ]% |
|---------|--------|--------|--|
| 50 A    | 0,41 A | 0,23 A | -43,9%                                 |
| 200 A   | 1,1 A  | 0,70 A | -36,4%                                 |
| 400 A   | 1,7 A  | 1,4 A  | -17,6%                                 |
| 600 A   | 2,3 A  | 2,0 A  | -13,0%                                 |
| 800 A   | 3,0 A  | 2,6 A  | -13,3%                                 |



Tal como muestra la figura 70, se evidencia que existe una reducción del 13,0% hasta del 43,9% de la CMC 1, básicamente esta reducción se debe a la correcta implementación del procedimiento de calibración, considerando las indicaciones en el PC-025 Procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas del INACAL y el Procedimiento EL-007 para la calibración de pinzas amperimétricas del CEM. De manera adicional, el CMC 2 cuenta con el alcance para la calibración en corriente continua, a diferencia del CMC 1, que solo cuenta con un alcance de corriente alterna, esto incrementa al doble la capacidad que tendrá el laboratorio para realizar la calibración de pinzas tanto en corriente AC y DC.

### 4.3. Verificación del método

#### a) Evaluación de la veracidad

Las tablas 28 y 29 muestran el resumen de los resultados de evaluación de veracidad desarrollados en el apartado 3.3.3. Se puede evidenciar que el valor del  $t$  experimental es menor al  $t$  crítico para los resultados en corriente continua y corriente alterna, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, concluyendo que la medias de los  $p$  grupos (5 técnicos metrólogos) no presentan diferencias significativas, aceptando el resultado para los distintos valores nominales.

**Tabla 28**

*Resumen de los resultados de la evaluación de la veracidad en DC.*

| Nominal | sesgo   | t exp. | t crít. |
|---------|---------|--------|---------|
| 2,1 mA  | 0,00 mA | 0,345  | 2,7764  |
| 21 mA   | 0,0 mA  | 1,8257 | 2,7764  |
| 100 mA  | 0,0 mA  | 1,633  | 2,7764  |
| 20 A    | 0,01 A  | 2,4618 | 2,7764  |
| 200 A   | 0,01 A  | 2,1539 | 2,7764  |
| 1000 A  | -0,01 A | 0,0822 | 2,7764  |

**Tabla 29**

*Resumen de los resultados de la evaluación de la veracidad en AC.*

| Nominal | sesgo   | t exp. | t crít. |
|---------|---------|--------|---------|
| 3 mA    | 0,00 mA | 2,500  | 2,7764  |
| 30 mA   | 0,00 mA | 1,9612 | 2,7764  |
| 300 mA  | -0,1 mA | 2,2613 | 2,7764  |
| 20 A    | 0,00 A  | 1,3608 | 2,7764  |
| 500 A   | 0,16 A  | 2,4902 | 2,7764  |
| 1000 A  | -0,1 A  | 2,4977 | 2,7764  |

## b) Evaluación de la precisión

Las tablas 30 y 31 muestran el resumen de los resultados de evaluación de precisión desarrollados en el apartado 3.3.4. Se puede evidenciar que el valor del F crítico es mayor al F calculado para los resultados en corriente continua y corriente alterna, por lo tanto, se concluye que las varianzas de los 5 técnicos metrólogos no son significativamente diferentes.

Además, se puede apreciar que el coeficiente de variación en condiciones de repetibilidad (CVR) es menor al criterio de aceptación establecido como 2,0 %, concluyendo que existe una menor dispersión de los resultados y un valor de media más representativa. También se puede apreciar que el coeficiente de variación en condiciones de precisión intralaboratorio (CVWL) es menor del 2,0 %, concluyendo que la varianza entre grupos e intra-grupo, provenientes de la variación total del factor agrupamiento y el factor dentro de los grupos respectivamente, demuestran que no existe un comportamiento diferente entre los resultados de los técnicos metrólogos.

**Tabla 30**

*Resumen de los resultados de la evaluación de la precisión en DC.*

| Nominal | Fcalc. | Fcrít. | Pvalue | CVR    | CWL    |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2,1 mA  | 1,17   | 3,48   | 0,38   | 0,21 % | 0,22 % |
| 21 mA   | 1,50   | 3,48   | 0,27   | 0,28 % | 0,30 % |
| 100 mA  | 0,50   | 3,48   | 0,74   | 0,04 % | 0,04 % |
| 20 A    | 2,06   | 3,48   | 0,16   | 0,04 % | 0,04 % |
| 200 A   | 0,56   | 3,48   | 0,70   | 0,01 % | 0,01 % |
| 1000 A  | 0,34   | 3,48   | 0,84   | 0,07 % | 0,07 % |

**Tabla 31**

*Resumen de los resultados de la evaluación de la precisión en AC.*

| Nominal | Fcalc. | Fcrít. | Pvalue | CVR    | CWL    |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3 mA    | 0,57   | 3,48   | 0,69   | 0,23 % | 0,23 % |
| 30 mA   | 0,43   | 3,48   | 0,78   | 0,03 % | 0,03 % |
| 300 mA  | 2,10   | 3,48   | 0,16   | 0,04 % | 0,05 % |
| 20 A    | 0,68   | 3,48   | 0,62   | 0,06 % | 0,06 % |
| 500 A   | 0,49   | 3,48   | 0,75   | 0,07 % | 0,07 % |
| 1000 A  | 0,74   | 3,48   | 0,59   | 0,02 % | 0,02 % |

#### 4.4. Evaluación del desempeño

Un resumen de los resultados obtenidos de la comparación interlaboratorio se muestra en la tabla 32. Se puede observar que en los 3 puntos de medición (37,8 A – 378 A – 900 A) 60 Hz, el laboratorio LAB 9 obtuvo un error normalizado (EN) por debajo de 1.

De esta manera se evidencia que el laboratorio materia de investigación es competente y proporciona resultados válidos y confiables, para realizar la calibración de pinzas amperimétricas.

Se debe resaltar que la participación en ejercicios de comparación interlaboratorio permite a un laboratorio evaluar de manera objetiva su desempeño y calidad de las mediciones frente a otros laboratorios participantes.

**Tabla 32**

*Resultados de la evaluación del desempeño.*

| Laboratorio | 37,8 A - 60 Hz |        |            | 378 A - 60 Hz |       |            | 900 A - 60 Hz |       |            |
|-------------|----------------|--------|------------|---------------|-------|------------|---------------|-------|------------|
|             | Error          | U      | EN         | Error         | U     | EN         | Error         | U     | EN         |
| INACAL      | 0,12 A         | 0,11 A | ---        | 1,1 A         | 1,0 A | ---        | 7,0 A         | 2,0 A | ---        |
| LAB 9       | 0,15 A         | 0,21 A | <b>0,1</b> | 0,7 A         | 1,4   | <b>0,2</b> | 7             | 3,0 A | <b>0,0</b> |

Finalmente, como evidencia de que la implementación de un procedimiento de calibración de pinzas amperimétricas basado en la norma NTP ISO/IEC 17025:2017 mejoró el alcance de acreditación de la empresa metrológica, se adjunta la figura 71, la cual es extraída de la página oficial del organismo de acreditación A2LA.

**Figura 71**

*Nuevo alcance de calibración válido desde abril del 2022 hasta agosto del 2023.*

| Parameter/Equipment          | Range  | CMC (±)   | Comments                        |
|------------------------------|--|---|---------------------------------|
| DC Current – Clamp On Meters | (2.1 to 20.99) mA<br>(21 to 100) mA<br><br>(1 to 20) A<br>(20 to 40) A<br>(40 to 200) A<br>(200 to 1000) A | 0.0058 mA<br>0.058 mA<br><br>21 µA/A + 5.7 mA<br>6.9 mA/A + 0.15 A<br>6.8 mA/A + 0.16 A<br>5.3 mA/A + 0.50 A  | Transmille 3041A & work station |
| AC Current – Clamp On Meters | 56 Hz  | 0.13 mA/A + 8.9 µA<br>0.26 mA/A + 7.2 µA<br>0.20 mA/A + 53 µA<br>0.35 mA/A + 36 µA<br><br>1.0 mA/A + 0.67 mA<br>4.2 mA/A -4.1 mA<br>1.0 mA/A + 2.6mA<br>1.0 mA/A + 4.5mA<br><br>3.2 mA/A + 72 mA<br>3.3 mA/A + 93 mA<br>3.2 mA/A + 100 mA | Transmille 3041A & Workstation  |

Fuente: A2LA (2022).

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

La implementación de un procedimiento de calibración de pinzas amperimétricas basado en la norma NTP ISO/IEC 17025:2017 mejoró el alcance de acreditación de una empresa metrológica. En ese sentido, se redujo la CMC en los puntos de calibración de corriente alterna y se adicionó un nuevo alcance en la calibración de corriente continua.

La estimación de la incertidumbre de medición siguiendo los criterios de la GUM y la documentación de procedimientos validados (CEM EL-007, INACAL PC-025) mejoró la capacidad de medición y calibración de la empresa metrológica para realizar la calibración de pinzas amperimétricas.

La validación de la hoja de cálculo haciendo uso del software MATLAB, garantizó la fiabilidad de los resultados emitidos en los certificados de calibración. De esta manera, se evidenció que las hojas de cálculo implementadas registran, procesan y presentan los resultados de medición, según lo indicado en el procedimiento de calibración.

La verificación del procedimiento de calibración a través de las pruebas de veracidad y precisión, aseguró la confiabilidad de los resultados emitidos, evidenciando que el laboratorio puede aplicar correctamente el procedimiento de calibración de pinzas amperimétricas, bajo condiciones propias de trabajo.

A partir de los resultados obtenidos en la comparación interlaboratorio, se demostró que el laboratorio tiene un buen desempeño para realizar la calibración de pinzas amperimétricas, garantizando la calidad de los resultados emitidos.

## **5.2. Recomendaciones**

Asegurar que la revisión y aprobación de un procedimiento de calibración basado en la ISO/IEC 17025:2017 sea realizado por personal competente y a fin con la magnitud, de esta forma se pueden identificar errores para su posterior corrección.

Contar con personal técnico de laboratorio competente para realizar la actividad de estimación de la incertidumbre de medición, documentando su educación, calificación, formación, conocimiento técnico, habilidades y experiencia, como evidencia frente a una auditoría.

Elegir cualquier software que resulte ser más conveniente, práctico y fácil de usar por el personal del laboratorio para realizar la validación de la hoja de cálculo. Por ejemplo: PYTON.

Considerar como valor de referencia en la evaluación del sesgo, los resultados entregados por un técnico que ha participado en comparaciones interlaboratorio o ensayos de aptitud de la misma magnitud.

Realizar las comparaciones interlaboratorio según un cronograma, para asegurar que se cuente con el personal, patrones de medición e instalaciones y condiciones ambientales adecuadas para su ejecución.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aladdin, et al. (2022). *A New Technique for High Current Calibrations Using Low Voltage Reference Standards*. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 25(3), 30–36. <https://doi.org/10.1109/mim.2022.9759360>

A2LA. (2022, 13 de junio). *Search A2LA Directory of Accredited Organizations*. <https://customer.a2la.org/index.cfm?event=directory.index>

Baena, G. (2017). *Metodología de la investigación. Serie integral por competencias (3ra ed.)*. Grupo Editorial Patria.

Bernal, C. (2010). *Metodología de la Investigación*. Pearson Educación.

Bureau International des Poids et Mesures [BIPM]. (2022, 4 de mayo). *Number of key comparisons by state or economy*. <https://www.bipm.org/kcdb/comparison/statistics/key>

BIPM. (2023, 21 de febrero). *Search*. <https://www.bipm.org/kcdb/cmcc/quick-search?includedFilters=&excludedFilters=&page=0&keywords=%22peru%22>

Ander, E. (2011). *Aprender a investigar*. Editorial Brujas.

CEM. (2008). *EL-007 Procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas (Edición digital 1)*. <https://www.cem.es/sites/default/files/el-007e.pdf>

CEM. (2019). Centro Español de Metrología. <https://www.cem.es/es/servicios/certificados-cem>

Center Technology Corp. (2022). *CENTER 342\_ Datalogger Temperature Humidity Recorder*. [http://www.centertek.com/product\\_d.php?lang=en&tb=1&id=127&cid=76](http://www.centertek.com/product_d.php?lang=en&tb=1&id=127&cid=76)

Comité de Evaluación de la Conformidad [CASCO]. (2010). *ISO/IEC 17043 Evaluación de la conformidad-Requisitos generales para los ensayos de aptitud*. [https://interlab.mx/pdf/ISO\\_IEC\\_17043\\_Esp2011.pdf](https://interlab.mx/pdf/ISO_IEC_17043_Esp2011.pdf)

Comité Técnico de acreditación de laboratorios clínicos. (2021). *Directriz para la verificación de los procedimientos de análisis cuantitativos en los laboratorios clínicos*. [https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/4/jer/documentosespecificos/files/LabCli%2FDA-acr-21D%20V01%20Directriz%20de%20Verificaci%C3%B3n%20cuantitativos-%20Laboratorio%20Cl%C3%ADnico\(2021-10-28\).pdf](https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/4/jer/documentosespecificos/files/LabCli%2FDA-acr-21D%20V01%20Directriz%20de%20Verificaci%C3%B3n%20cuantitativos-%20Laboratorio%20Cl%C3%ADnico(2021-10-28).pdf)

Comité técnico del INACAL. (2020). *Directriz de criterios para la participación de ensayos de aptitud/comparaciones interlaboratorios*. <https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/4/jer/documentosespecificos/files/Documentos%20Especificos%2FOI%2FDA-acr-13D%20V04%20Directriz%20de%20Ensayos%20de%20Aptitud%202020-02-26%20firma.pdf>

DA- INACAL. (2022, 4 de mayo). *Reporte estadístico Nov – Dic 2021*. <https://www.gob.pe/institucion/inacal/informes-publicaciones/2826724-reporte-estadistico-nov-dic-2021>

Delgado, G. (2009). Validación y verificación de métodos de ensayos. Un dilema en los laboratorios de ensayos y en las auditorías de la acreditación. [https://www.researchgate.net/publication/260676503\\_Validacion\\_y\\_verificacion\\_de\\_metodos\\_de\\_ensayos\\_Un\\_dilema\\_en\\_los\\_laboratorios\\_de\\_ensayos\\_y\\_en\\_las\\_auditorias\\_de\\_la\\_acreditacion](https://www.researchgate.net/publication/260676503_Validacion_y_verificacion_de_metodos_de_ensayos_Un_dilema_en_los_laboratorios_de_ensayos_y_en_las_auditorias_de_la_acreditacion)

Díaz, H. (2018). *Calibración de pinzas amperimétricas*. Eventos INACAL 2018. <https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/5/jer/eventos/files/26%20Calibracion%20de%20pinzas%20amperimetricas.pdf>

Dirección de Acreditación del INACAL [DA – INACAL]. (2022, 2 de mayo). *Presentación*. <https://www.inacal.gob.pe/acreditacion/categoria/presentacion>

Entidad Nacional de Acreditación [ENAC]. (2022, 12 de abril). *¿Qué es la acreditación?* <https://www.enac.es/que-hacemos/-que-es-la-acreditacion->

EURACHEM. (2016). *La adecuación del uso de los métodos analíticos*. [https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/MV\\_guide\\_2nd\\_ed\\_ES.pdf](https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/MV_guide_2nd_ed_ES.pdf)

FLUKE. (2022, 12 de abril). *Interior de la pinza amperimétrica de transformador de corriente (CA)*. <https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/pinzas/interior-de-la-pinza-amperimetrica-de-transformador-de-corriente-ca>

Galliana & Capra. (2012). *Traceable Technique to Calibrate Clamp Meters in AC Current From 100 to 1500 A*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 61(9), 2512–2518. <https://doi.org/10.1109/tim.2012.2188660>

Gusqui. C. (2021). *Implementación de un banco para calibración de cronómetros utilizando un oscilador de rubidio para el laboratorio de metrología de la facultad de mecánica*. [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esoch.edu.ec/bitstream/123456789/15093/1/15T00751.pdf>

Hernández, et al. (2014). *Metodología de la investigación*. McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>

Hernández & Mendoza (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

INACAL. (2015). *Presentación-INACAL*. <https://www.inacal.gob.pe/metrologia/categoria/presentacion>

INACAL. (2018). Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Norma NTP-ISO/IEC 17025:2017 (3.ª ed.).

INACAL. (2019). PC-025 Procedimiento para la calibración de pinzas amperimétricas (Primera Edición).

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. (2009). Vocabulario internacional de metrología conceptos fundamentales, generales y términos asociados (VIM). <https://es.scribd.com/document/430210383/61578282-GTC-ISO-IEC-99-pdf>

Instituto de Salud Pública de Chile. (2010). *Validación de métodos y determinación de la incertidumbre de la medición: “Aspectos generales sobre la validación de métodos”*. [https://www.academia.edu/24922817/Validaci%C3%B3n\\_de\\_m%C3%A9todos\\_y\\_determinaci%C3%B3n\\_de\\_la\\_incertidumbre\\_de\\_la medici%C3%B3n\\_Aspectos\\_generales\\_sobre\\_la\\_validaci%C3%B3n\\_de\\_m%C3%A9todos\\_](https://www.academia.edu/24922817/Validaci%C3%B3n_de_m%C3%A9todos_y_determinaci%C3%B3n_de_la_incertidumbre_de_la medici%C3%B3n_Aspectos_generales_sobre_la_validaci%C3%B3n_de_m%C3%A9todos_)

JCGM. (2013). *Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. Centro Español de Metrología. <https://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>

Laboratorio de electricidad de la dirección de metrología del INACAL. (2018). *Informe final de la evaluación de desempeño DM-LE-07*.

<https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/5/jer/informes-de-comparaciones-y-ensayos-de-aptitud/files/1.%20INFORME%20FINAL%20DM-LE-07>

Ludeña. L. (2019). Diseño e implementación de un túnel de viento de circuito abierto para una mejor exactitud en la calibración de anemómetros. [Tesis de Pregrado, Universidad Tecnológica del Perú].

[https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/2377/Lenin%20Lude%201a\\_Trabajo%20de%20Suficiencia%20Profesional\\_Titulo%20Profesional\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/2377/Lenin%20Lude%201a_Trabajo%20de%20Suficiencia%20Profesional_Titulo%20Profesional_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Mendenhall et al. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística*. Brooks/Cole. <https://www.fcfm.buap.mx/jzacarias/cursos/estad2/libros/book5e2.pdf>

Méndez, C. (2011). *Metodología Diseño y desarrollo del proceso de investigación con énfasis en ciencias empresariales*. Limusa. <https://doku.pub/documents/metodologia-de-la-investigacion-carlos-mendez-1pdf-8lyzpjxdoeqd>

Mendoza et al. (2009). *Procedimiento de comparación entre laboratorios de calibración basado en el criterio del error normalizado*. Scientia et Technica, XV (42), 226–229. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84916714042>

Merello, G. (2021). Diseño, implementación y calibración de un módulo de medición de conductividad térmica de líquidos por el método transitorio del hilo caliente. [Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Santa María].

<http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/UCSM/10609/4M.0382.IM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Metas & Metrólogos Asociados. (2006). *Capacidad de medición*. <http://www.metas.com.mx/guiamet/La-Guia-MetAs-06-03-Mejor-Capacidad-de-Medicion.pdf>

Ministerio de Salud Costa Rica (s.f.). *GUIA DE VALIDACIÓN DE METODOS ANALITICOS*. [https://www.academia.edu/25510655/GUIA\\_DE\\_VALIDACION\\_DE\\_METODOS\\_ANALITICOS](https://www.academia.edu/25510655/GUIA_DE_VALIDACION_DE_METODOS_ANALITICOS)

Morales, A. (2018). La Elaboración y Evaluación de las Capacidades de Medición y Calibración (CMC). Recomendaciones prácticas para metrologos y expertos técnicos. [https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/5/jer/eventos/files/21.-Elaboracion\\_y\\_Evaluacion\\_de\\_las\\_Capacidades\\_de\\_Medicion\\_y\\_Calibracion\\_CMC\\_Recomendaciones\\_practicas\\_para\\_metrologos\\_y\\_expertos\\_tecnicos.pdf](https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/5/jer/eventos/files/21.-Elaboracion_y_Evaluacion_de_las_Capacidades_de_Medicion_y_Calibracion_CMC_Recomendaciones_practicas_para_metrologos_y_expertos_tecnicos.pdf)

Ñaupás, H. et al. (2014). *Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis*. Ediciones de la U.

Pérez, M. (2012). *Estimación de incertidumbres. Guía GUM*.  
[https://www.uv.es/meliajl/Docencia/WebComplementarios/GuiaGUM\\_e\\_medida.pdf](https://www.uv.es/meliajl/Docencia/WebComplementarios/GuiaGUM_e_medida.pdf)

Samplon et al. (2015). *A Novel Calibration Method for Ampere's Law-Based Current Measuring Instruments*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 64(3), 715–722. <https://doi.org/10.1109/tim.2014.2359519>

San Miguel, E. (2011). Validación de técnicas analíticas. transferencia a los laboratorios regionales. [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/remesa/docs/RELABSA/Madrid-Algete\\_Juin\\_2011/20\\_VALIDACION\\_DE\\_TECNICAS\\_ANALITICAS.\\_TRANSFERENCIA\\_A\\_LOS\\_LABORATORIOS\\_REGIONALES.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/remesa/docs/RELABSA/Madrid-Algete_Juin_2011/20_VALIDACION_DE_TECNICAS_ANALITICAS._TRANSFERENCIA_A_LOS_LABORATORIOS_REGIONALES.pdf)

Schimid & Lazos. (2000). Guía para estimar la incertidumbre de la medición. CENAM. [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/GUIAPARAESTIMARLAINCERTIDUMBRE\(CENAM\)\\_26566.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/GUIAPARAESTIMARLAINCERTIDUMBRE(CENAM)_26566.pdf)

Sistema Interamericano de Metrología. (17 de mayo de 2022). Sobre nosotros. <https://sim-metrologia.org/about-us/>

Sociedad Brasileira de metrologia. (s.f). *Acuerdo de Reconocimiento Mutuo*. [http://bom.org.br:8080/jspui/bitstream/2050011876/300/1/DOC-16319-09-DIAG-03%20Acordos%20de%20Reconhecimento%20M%C3%BAtuo\\_esp.pdf](http://bom.org.br:8080/jspui/bitstream/2050011876/300/1/DOC-16319-09-DIAG-03%20Acordos%20de%20Reconhecimento%20M%C3%BAtuo_esp.pdf)

Solórzano. C. (2018). Diseño de sistema de calibración de manómetros de presión diferencial para la industria farmacéutica. [Tesis de pregrado, Universidad del Valle de Guatemala].  
<https://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/static/flowpaper/template.html?path=/bitstream/handle/123456789/3483/Trabajo%20de%20graduaci%c3%b3n%20-%20Carlos%20Sol%c3%b3rzano.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Tarrillo. L. (2019). Elaboración de un procedimiento operativo estándar de calibración de material volumétrico de vidrio para el Centro de Control de Calidad de Medicamentos de la Universidad Nacional de Trujillo [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. <https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/12264/Tarrillo%20Peralta%20Lizbeth%20Katarini-convertido.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Transmille. (2012). 3000A Series Precision Multi Product Calibrator Operation Manual. [https://www.transmille.com/file\\_upload/3000-Series-Operation-Manual-V5-10.pdf](https://www.transmille.com/file_upload/3000-Series-Operation-Manual-V5-10.pdf)

Transmille. (s.f.). EA015 multi function Workstation adapter Specifications. <https://transmillecalibration.com/wp-content/uploads/2018/05/EA015-Extended-Specifications.pdf>

Transmille. (s.f.). *Transmille 3041A precisión multiproduct calibrator Extended specifications*. [https://www.transmille.com/file\\_upload/3041A-Extended-Specifications-V1-62.pdf](https://www.transmille.com/file_upload/3041A-Extended-Specifications-V1-62.pdf)

Vicente. T. (2017). *Ampliación y mejora de la capacidad de medida y calibración de higrómetros de punto de rocío con el patrón nacional de humedad en el margen de -10 °C a 95 °C*. [Tesis de doctorado, Universidad de Valladolid]. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/27498/Tesis1310171201.pdf;jsessionid=EFF9B905960F6FF87DD62EF9BE62AD8B?sequence=1>

Zapata, F. (2019). *Coeficiente de determinación: fórmulas, cálculo, interpretación, ejemplos*. Lifeder. Recuperado de <https://www.lifeder.com/coeficiente-de-determinacion/>.

Zorrilla, S. (1993). *Introducción a la metodología de la investigación* (11 ed.). México: Aguilar León y Cal Editores.

## ANEXOS

### Anexo A. Matriz de consistencia

| Título: Implementación de un procedimiento de calibración de pinzas amperimétricas basado en la norma NTP ISO/IEC 17025:2017 para mejorar el alcance de acreditación de una empresa metrológica (2021 - 2022)           |  |  |                                   |   |  |
|---|--|--|-----------------------------------|---|--|
| Problema Principal  | Objetivo General   | Variable Independiente (V.I)   |                                   | Variable Dependiente (V.D)                                |  |
| ¿En qué medida la implementación de un procedimiento de calibración de pinzas amperimétricas basado en la norma NTP ISO/IEC 17025:2017 podrá mejorar el alcance de acreditación de una empresa metrológica (2021-2022)? | Determinar en qué medida la implementación de un procedimiento de calibración de pinzas amperimétricas basado en la norma NTP ISO/IEC 17025:2017 mejora el alcance de acreditación de una empresa metrológica (2021-2022). | Independiente (X):<br>Procedimiento de calibración de pinzas amperimétricas. |                                   | Dependiente (Y):<br>Alcance de acreditación               |  |
| Problema Especifico 1   | Objetivos Especifico 1   | V.I1   | Indicador 1                       | V.D 1   | Indicador 1  |
| ¿Cómo mejorar la capacidad de medición y calibración mediante la estimación de incertidumbre de medición?   | Estimar la incertidumbre de medición para mejorar la capacidad de medición y calibración (CMC).  | Independiente (X1):<br>Estimación de la incertidumbre de medición.           | Sí implementado / No implementado | Dependiente (Y1):<br>Capacidad de Medición y Calibración. | [(CMC actual/CMC anterior)-1] *100%  |
| Problema Especifico 2   | Objetivos Especifico 2   | V.I 2  | Indicador 2                       | V.D 2   | Indicador 2  |
| ¿Cómo garantizar la fiabilidad de los resultados emitidos mediante la validación de la hoja de cálculo?   | Validar la hoja de cálculo para garantizar la fiabilidad de los resultados emitidos.   | Independiente (X2):<br>Validación de hoja de cálculo                         | Sí implementado / No implementado | Dependiente (Y2):<br>Fiabilidad de los resultados         | (Resultado de hoja de cálculo/ Resultado con software de validación) * 100%  |
| Problema Especifico 3   | Objetivos Especifico 3   | V.I 3  | Indicador 3                       | V.D 3   | Indicador 3  |
| ¿Cómo asegurar la confiabilidad de los resultados mediante la verificación del procedimiento de calibración?  | Asegurar la confiabilidad de los resultados mediante la verificación del procedimiento de calibración.   | Independiente (X3):<br>Verificación del procedimiento de calibración.        | Sí implementado / No implementado | Dependiente (Y3):<br>Confiabilidad de los resultados      | Veracidad: Prueba t de student. texperimental < tcrítico<br><br>Precisión: Coeficientes de variación<br>CVR < 2% ; CVWL < 2% |
| Problema Especifico 4   | Objetivos Especifico 4   | V.I 4  | Indicador 4                       | V.D 4   | Indicador 4  |
| ¿Cómo evaluar el desempeño del laboratorio mediante la participación en comparaciones interlaboratorios?  | Evaluar el desempeño del laboratorio a través de la comparación interlaboratorio.  | Independiente (X4):<br>Comparación interlaboratorio                          | Sí implementado / No implementado | Dependiente (Y4):<br>Desempeño del laboratorio            | Error normalizado:<br>En <1  |

## **Anexo B. Glosario de términos**

Términos extraídos de la GTC-ISO/IEC 99:2012. Vocabulario Internacional de Metrología.

Conceptos fundamentales y generales y términos asociados (VIM).

**Bobina multiplicadora de corriente.** Elemento utilizado para realizar la calibración de pinzas amperimétricas en corriente AC y DC, trabaja en conjunto con un generador de corriente, multiplicando de forma eficaz la salida de corriente del calibrador por “n” veces el número de vueltas de la bobina.

**Exactitud de medición.** Proximidad del acuerdo entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando.

**Factor de cobertura.** Número mayor que uno por el que se multiplica una incertidumbre estándar combinada para obtener una incertidumbre expandida.

**Mensurando.** Es aquella magnitud que se desea medir.

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

**Procedimiento de medición.** Descripción detallada de una medición conforme a una o más principios de medición y a un método de medición dado, basado en un modelo de medición y que incluye los cálculos necesarios para obtener un resultado de medición.

**Resolución.** Mínima variación de la magnitud medida que da lugar a una variación perceptible de la indicación correspondiente.

**Resultado de medición.** Conjunto de valores de una magnitud atribuidos a un mensurando, acompañados de cualquier otra información relevante disponible.

**Sistema de unidades.** Conjunto de unidades de base y unidades derivadas, sus múltiplos y submúltiplos conforme a reglas dadas, para un sistema de magnitudes dado.

**Trazabilidad metrológica.** Propiedad de un resultado de medición 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 medición.

**Unidad de medida.** 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 medido.** Valor de una magnitud que representa un resultado de medición.

**Valor nominal.** Valor redondeado o aproximado de una magnitud característica de un instrumento o sistema de medición, que sirve de guía para su utilización apropiada.

**Veracidad de medición.** Proximidad entre la media de un número infinito de valores medidos repetidos y un valor de referencia.

**Verificación.** Suministro de evidencia objetiva de que un ítem satisface los requisitos especificados.

## Anexo C. Especificaciones técnicas del equipamiento.

### Figura C1

*Especificaciones técnicas del calibrador multifunción 3041A.*

| 3041A EXTENDED SPECIFICATIONS | General Specifications  |   | TRANSMILLE LTD |
|-------------------------------|---|---|----------------|
| Warm Up Time                  | Double the time since last used up to 20 minutes maximum  |   |                |
| Standard Interfaces           | USB   |   |                |
| Optional Interfaces           | GPIB (IEEE-488) : RS232   |   |                |
| Temperature Performance       | Storage : -5°C to +60°C<br>Operation : 0°C to +50°C   |   |                |
| Relative Humidity             | Operation : <80% to 30°C, <70% to 40°C, <40% to 50°C<br>Storage : <95%, non-condensing  |   |                |
| Altitude                      | Operation : 3000m (10,000ft) Maximum<br>Transit : 12000m (40,000ft) Maximum   |   |                |
| EMC & Safety                  | The calibrator line input plug must be earthed<br>See D.O.C for full details  |   |                |
| Line Power                    | Line Voltage Selectable : 110V / 230V<br>Line Frequency : 50Hz to 60Hz<br>Line Voltage Variation : -6% +10%   |   |                |
| Power Consumption             | 28 Watts (Standby)  | 200 Watts (Maximum)   |                |
| Low Analogue Isolation        | 100V  |   |                |
| Connections                   | Voltage / 2 Wire Resistance<br>Low Current (<=2A)<br>High current (>2A)<br>Earth Connection<br>Oscilloscope Functions<br>Adapter Interface<br>USB Interface | 1x Black : 1x White 4mm Safety sockets<br>1x Black : 1x Red 4mm Safety sockets<br>1x Blue : 1x Yellow 4mm Safety sockets<br>1x Green 4mm Safety Socket<br>2x BNC terminal<br>1x Female 'D' type socket<br>1x Female 'B' type socket |                |
| Display Information           | Type<br>Viewing Area<br>Resolution<br>Backlight Type<br>Brightness  | Backlit blue on white STN Type<br>133mm * 39mm<br>240 x 64 dots<br>LED<br>230 to 260 cd/m <sup>2</sup>  |                |
| Indicators                    | Voltage / Current / High Current<br>Negative to ground<br>Oscilloscope<br>Adapter Interface   | Red LED (between terminals)<br>Green LED (left of Earth terminal)<br>Green LED (right of BNC Connector)<br>Green LED (right of 'D' type connector)  |                |
| Keyboard                      | Rubber key  |   |                |
| Fuses                         | Mains Inlet   | 3.15A A/S (240 Volt)<br>5A A/S (110 Volt operation)   |                |
| Isolation                     | Outputs are opto-isolated from mains earth and the USB interface<br>Maximum common mode voltage between earth and the low terminals 30 Volts ac/dc.         |   |                |
| Dimensions & Weights          | Calibrator Only<br>Calibrator in Shipping Box<br>Calibrator in Soft Carry Case<br>Calibrator in Hard Transit case   | 14cm x 43cm x 46cm : 12.5kgs<br>58cm x 56cm x 37cm : 15kgs<br>49cm x 50cm x 19cm : 13.5kgs<br>55cm x 56cm x 26cm : 22kgs  |                |
| Warranty Period               | 3 Years (Parts & Labour)  |   |                |
| Recommended Service Interval  | 1 Year  |   |                |
| Supplied Connections          | 1x USB Interface Connection<br>1x Adaptor Connection Lead (if at least one adaptor ordered)   | 1x Mains Lead   |                |
| Optional Lead Set Kit         | 1x Voltage connection leadset<br>1x Low Current connection leadset<br>1x High current connection leadset<br>1x AC connection leadset                        |   |                |
| Mounting Kit (optional)       | 3U rack mount kit   |   |                |
| Case Colour                   | Cream (RAL 9002)  |   |                |

Fuente: Transmille (s.f.).

## Figura C2

Especificaciones técnicas del calibrador multifunción 3041A, para corriente continua.

3041A EXTENDED SPECIFICATIONS

DCI Specifications

TRANSMILLE LTD

### 1 Year Total Accuracy Specifications at TCal $\pm 5^{\circ}\text{C}$ & Range Parameters

| Range               | Resolution       | Max. Inductive Load | Compliance Voltage | Overload Protection | 1 Year Total |   |               |
|---------------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------|---|---------------|
|                     |                  |                     |                    |                     | % set        | + | $\mu\text{A}$ |
| 0-202 $\mu\text{A}$ | 100pA            | 10mH                | 4.2 Volts          | 150V                | 0.010        | + | 0.03          |
| 0.2-2.02mA          | 1nA              | 10mH                | 4.2 Volts          | 150V                | 0.008        | + | 0.04          |
| 2-20.2mA            | 10nA             | 10mH                | 4.2 Volts          | 150V                | 0.005        | + | 0.3           |
| 20-202mA            | 100nA            | 10mH                | 4.2 Volts          | 150V                | 0.008        | + | 3             |
| 0.2-2.02A           | 1 $\mu\text{A}$  | 10mH                | 4.2 Volts          | 150V                | 0.015        | + | 35            |
| 2-30A               | 10 $\mu\text{A}$ | 10mH                | 3.9 Volts          | 150V                | 0.040        | + | 350           |

### Stability (Accuracy relative to calibration Standards)

| Range               | Noise <sup>1</sup><br>0.1-1Hz | 90 day Rel |               | 180 Day Rel |               | 1 year Rel |               | 2 year Rel |               |
|---------------------|-------------------------------|------------|---------------|-------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|
|                     |                               | %Set       | $\mu\text{A}$ | %Set        | $\mu\text{A}$ | %Set       | $\mu\text{A}$ | %Set       | $\mu\text{A}$ |
| 0-202 $\mu\text{A}$ | 180pA                         | 0.0064     | + 0.03        | 0.0072      | + 0.03        | 0.0080     | + 0.03        | 0.0112     | + 0.042       |
| 0.2-2.02mA          | 500pA                         | 0.0056     | + 0.04        | 0.0063      | + 0.04        | 0.0070     | + 0.04        | 0.0098     | + 0.056       |
| 2-20.2mA            | 4nA                           | 0.0032     | + 0.3         | 0.0036      | + 0.3         | 0.0040     | + 0.3         | 0.0056     | + 0.42        |
| 20-202mA            | 40nA                          | 0.0040     | + 3           | 0.0045      | + 3           | 0.0050     | + 3           | 0.0070     | + 4.2         |
| 0.2-2.02A           | 1 $\mu\text{A}$               | 0.0064     | + 35          | 0.0072      | + 35          | 0.0080     | + 35          | 0.0112     | + 49          |
| 2-30A <sup>2</sup>  | 20 $\mu\text{A}$              | 0.0240     | + 350         | 0.0270      | + 350         | 0.0300     | + 350         | 0.0420     | + 490         |

#### Notes

Note 1 : Typical RMS noise figures at 50% of full scale.

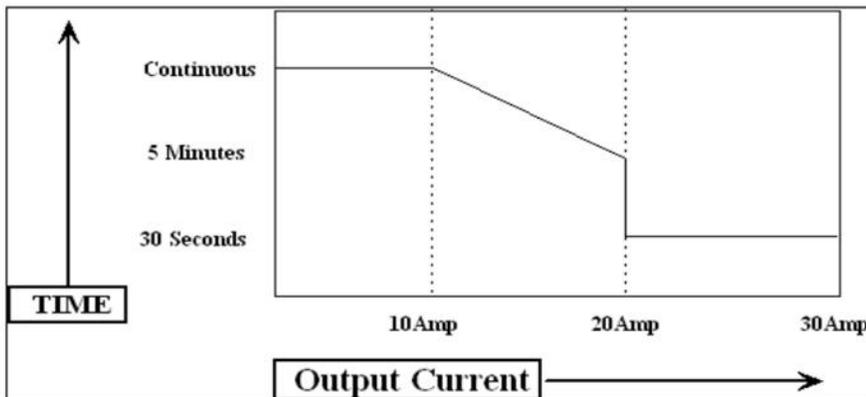
Note 2 : Power & temperature sensor on 30A range - microprocessor monitors & protects from overheating. Higher resistance loads allow a longer ON period. See graph 1 for details.

Note 3 : Specifications apply to loads of less than 10% of the maximum burden voltage.

Note 4 : Zero or floor allowance.

Specifications apply at TCal  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Outside this range an allowance of 0.18 x 1 Year Spec. per  $^{\circ}\text{C}$  should be added.



Graph 1\* : Operating time on 30A range with current into a short circuit at  $20^{\circ}\text{C}$   
Continuous current is available up to 10A output.

\* Note            Timing is started after a minimum period of 7 minutes at zero output.  
Shorter periods will reduce the output time available.

Fuente: Transmille (s.f.).

### Figura C3

Especificaciones técnicas del calibrador multifunción 3041A, para corriente alterna

3041A EXTENDED SPECIFICATIONS

ACI Specifications

TRANSMILLE LTD

#### 1 Year Total Accuracy Specifications at TCal ±5°C & Range Parameters

| Range      | Frequency     | Resolution | Maximum Burden Voltage (Peak) | Overload Protection | 1 year Accuracy |    |      |
|------------|---------------|------------|-------------------------------|---------------------|-----------------|----|------|
|            |               |            |                               |                     | %Set            | uA |      |
| 20-202uA   | 10Hz to 44Hz  | 1nA        | 3 Volts                       | 150V                | 0.20            | +  | 0.25 |
|            | 45Hz to 999Hz |            |                               |                     | 0.07            | +  | 0.25 |
|            | 1kHz to 10kHz |            |                               |                     | 0.80            | +  | 0.25 |
| 0.2-2.02mA | 10Hz to 44Hz  | 10nA       | 3 Volts                       | 150V                | 0.20            | +  | 0.5  |
|            | 45Hz to 999Hz |            |                               |                     | 0.06            | +  | 0.4  |
|            | 1kHz to 10kHz |            |                               |                     | 0.70            | +  | 0.7  |
| 2-20.2mA   | 10Hz to 44Hz  | 100nA      | 3 Volts                       | 150V                | 0.20            | +  | 5    |
|            | 45Hz to 999Hz |            |                               |                     | 0.06            | +  | 4    |
|            | 1kHz to 10kHz |            |                               |                     | 0.50            | +  | 7    |
| 20-202mA   | 10Hz to 44Hz  | 1uA        | 3 Volts                       | 150V                | 0.20            | +  | 50   |
|            | 45Hz to 999Hz |            |                               |                     | 0.06            | +  | 40   |
|            | 1kHz to 10kHz |            |                               |                     | 0.60            | +  | 70   |
| 0.2-2.02A  | 10Hz to 44Hz  | 10uA       | 3 Volts                       | 150V                | 0.20            | +  | 500  |
|            | 45Hz to 999Hz |            |                               |                     | 0.09            | +  | 400  |
|            | 1kHz to 5kHz  |            |                               |                     | 0.60            | +  | 700  |
| 2-30.0A    | 30Hz to 44Hz  | 100uA      | 2.8 Volts                     | 150V                | 0.20            | +  | 5000 |
|            | 45Hz to 99Hz  |            |                               |                     | 0.09            | +  | 2000 |
|            | 100Hz to 1kHz |            |                               |                     | 0.30            | +  | 4000 |

All specifications apply from 10% of full scale.

AC Frequency Accuracy : 30ppm

**Settling Time:** For 50% change in output: Less than 3 second from standby to within spec

**Inductive Loads :** Up to 1H may be connected without additional protection providing the frequency / inductance combination does not exceed the maximum burden voltage.

#### Notes

Note 1 : Temperature sensor on 30A range - microprocessor monitors & protects from overheating.

Higher resistance loads allow a longer ON period. See graph 5 for details.

Note 2 : Specifications apply to loads of less than 10% of the maximum burden voltage.

#### Driving Coils and Inductive Loads

When driving any load exceeding the maximum compliance voltage will cause the calibrator to trip into standby

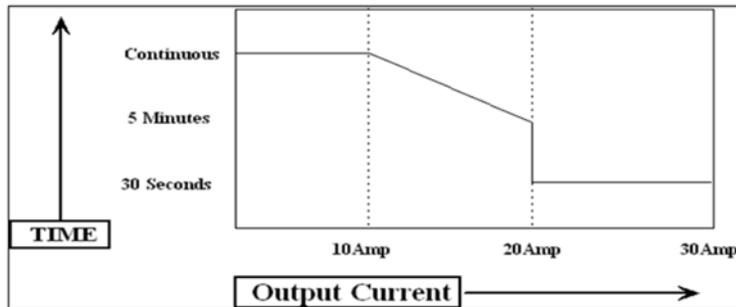
The maximum compliance voltage on the 10Amp range is specified at a max 2.8V RMS, 7.8V Peak to Peak at 220V supply

Slightly higher compliances are available when powered from a 240V supply.

When using EA002 with leads supplied it is possible to drive 30Amps/50Hz from a 230V supply, falling to 10Amps at 400Hz

Specifications apply at TCal ± 5°C.

Outside this range an allowance of 0.18 x 1 Year Spec. per °C should be added.



Graph 5\* : Operating time on 30A range with current into a short circuit at 20°C  
Continuous current is available up to 10A output.

\* Note Timing is started after a minimum period of 7 minutes at zero output.  
Shorter periods will reduce the output time available.

Fuente: Transmille (s.f.).

## Figura C4

Especificaciones técnicas de la estación de trabajo multifunción EA015.

| EA015 Specifications         | General Specifications  | TRANSMILLE LTD   |
|------------------------------|---|--|
| Warm Up Time                 | Double the time since last used up to 20 minutes maximum                                    |  |
| Standard Interface           | Transmille Adapter Interface (9 Pin Female 'D' Type connector)                              |  |
| Temperature Performance      | Storage : -5°C to +60°C<br>Operation : 0°C to +50°C   |  |
| Relative Humidity            | Operation : <80% to 30°C, <70% to 40°C, <40% to 50°C<br>Storage : <95%, non-condensing      |  |
| Altitude                     | Operation : 3000m (10,000ft) Maximum<br>Transit : 12000m (40,000ft) Maximum                 |  |
| Connections                  | Thermocouple Simulation   | 1x Neutral (copper) industry standard<br>Thermocouple socket [with temp. sensor] |
|                              | Continuity Resistance   | 1x Red Safety Socket   |
|                              | Insulation Resistance   | 1x Red Safety Socket   |
|                              | Common  | 1x Black Safety Socket   |
|                              | Voltage Measurement   | 1x Blue Safety Socket  |
|                              | Current Measurement   | 1x Blue Safety Socket  |
|                              | Voltage Output  | 1x Red Safety Socket   |
|                              | Low Current Output  | 1x Red Safety Socket   |
|                              | High Current Output   | 1x Yellow Safety Socket  |
|                              | Common  | 1x Black Safety Socket   |
|                              | Voltage [+] (from calibrator)   | 1x White Safety Socket   |
|                              | Voltage [-] (from calibrator)   | 1x Black Safety Socket   |
|                              | Current [+] (from calibrator)   | 1x Red Safety Socket   |
|                              | Current [-] (from calibrator)   | 1x Black Safety Socket   |
|                              | High Current [+] (from calibrator)  | 1x Yellow Safety Socket  |
|                              | High Current [-] (from calibrator)  | 1x Blue Safety Socket  |
|                              | 15V Input (from supplied adapter)   | 1x Jack socket   |
|                              | 2 Turn Coil Input   | 1x Yellow Safety Terminal  |
|                              | 10 Turn Coil Input  | 1x Yellow Safety Terminal  |
|                              | 50 Turn Coil Input  | 1x Yellow Safety Terminal  |
|                              | Coil Common Input   | 1x Blue Safety Terminal  |
| Indicators                   | Thermocouple Simulation   | Red LED Indicator  |
|                              | Continuity Resistance   | Red LED Indicator  |
|                              | Insulation Resistance   | Red LED Indicator  |
|                              | Voltage Measurement   | Red LED Indicator  |
|                              | Current Measurement   | Red LED Indicator  |
|                              | Voltage Output  | Red LED Indicator  |
|                              | Low Current Output  | Red LED Indicator  |
|                              | High Current Output   | Red LED Indicator  |
|                              | Optical Tachometer Output   | Red LED 8mm 20° Spread<br>Ultra bright LED mounted on front panel                |
| Dimensions                   | 28.8cm x 33.5cm x 15cm  |  |
| Warranty Period              | 1 Year (Parts & Labour)   |  |
| Recommended Service Interval | 1 Year  |  |
| Supplied Connections         | 1x Adapter Connection Lead<br>1x Workstation Leadset (for connection of calibrator outputs) |  |

Fuente: Transmille (s.f.).

**Figura C5**

*Especificaciones técnicas de la estación de trabajo multifunción EA015.*

| 2 Turn Coil Accuracy (Input 0 to 30A : Freq. DC - 30Hz to 60Hz : Effective Output 0 to 60A) |             |         |              |         |             |         |             |         |
|---|-------------|---------|--------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
|   | 90 Day Rel. |         | 180 Day Rel. |         | 1 Year Rel. |         | 2 Year Rel. |         |
|   | %           | A       | %            | A       | %           | A       | %           | A       |
| Effective accuracy - Coil only (wound clamps)   | 0.35        | + 0.008 | 0.35         | + 0.008 | 0.35        | + 0.008 | 0.35        | + 0.008 |
| Effective accuracy - Coil only (hall effect clamps)   | 0.48        | + 0.07  | 0.48         | + 0.07  | 0.48        | + 0.07  | 0.48        | + 0.07  |
| Total uncertainty with 3050 (All clamps)  | 0.51        | + 0.09  | 0.51         | + 0.09  | 0.52        | + 0.09  | 0.56        | + 0.10  |
| Total uncertainty with 3041 (wound clamps)  | 0.36        | + 0.028 | 0.36         | + 0.028 | 0.36        | + 0.028 | 0.38        | + 0.036 |
| Total uncertainty with 3041 (hall effect clamps)  | 0.49        | + 0.090 | 0.49         | + 0.090 | 0.49        | + 0.090 | 0.50        | + 0.098 |
| Total uncertainty with 3010 calibrator (wound clamps)                                       | 0.36        | + 0.010 | 0.36         | + 0.010 | 0.36        | + 0.010 | 0.37        | + 0.010 |
| Total uncertainty with 3010 (hall effect clamps)  | 0.48        | + 0.072 | 0.49         | + 0.072 | 0.49        | + 0.072 | 0.49        | + 0.072 |

| 10 Turn Coil Accuracy (Input 0 to 30A : Freq. DC - 30Hz to 60Hz : Effective Output 0 to 300A) |             |         |              |         |             |         |             |         |
|---|-------------|---------|--------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
|   | 90 Day Rel. |         | 180 Day Rel. |         | 1 Year Rel. |         | 2 Year Rel. |         |
|   | %           | A       | %            | A       | %           | A       | %           | A       |
| Effective accuracy - Coil only (wound clamps)   | 0.41        | + 0.01  | 0.41         | + 0.01  | 0.41        | + 0.01  | 0.41        | + 0.01  |
| Effective accuracy - Coil only (hall effect clamps)   | 0.59        | + 0.11  | 0.59         | + 0.11  | 0.59        | + 0.11  | 0.59        | + 0.11  |
| Total uncertainty with 3050 (All clamps)  | 0.61        | + 0.13  | 0.62         | + 0.13  | 0.62        | + 0.13  | 0.65        | + 0.14  |
| Total uncertainty with 3041 (wound clamps)  | 0.42        | + 0.03  | 0.42         | + 0.03  | 0.42        | + 0.03  | 0.43        | + 0.04  |
| Total uncertainty with 3041 (hall effect clamps)  | 0.60        | + 0.13  | 0.60         | + 0.13  | 0.60        | + 0.13  | 0.61        | + 0.14  |
| Total uncertainty with 3010 calibrator (wound clamps)   | 0.41        | + 0.012 | 0.42         | + 0.012 | 0.42        | + 0.012 | 0.42        | + 0.012 |
| Total uncertainty with 3010 (hall effect clamps)  | 0.59        | + 0.112 | 0.59         | + 0.112 | 0.60        | + 0.112 | 0.60        | + 0.112 |

| 50 Turn Coil Accuracy (Input 0 to 30A : Freq. DC - 30Hz to 60Hz : Effective Output 0 to 1500A) |             |         |              |         |             |         |             |         |
|--|-------------|---------|--------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
|  | 90 Day Rel. |         | 180 Day Rel. |         | 1 Year Rel. |         | 2 Year Rel. |         |
|  | %           | A       | %            | A       | %           | A       | %           | A       |
| Effective accuracy - Coil only (wound clamps)  | 0.24        | + 0.04  | 0.24         | + 0.04  | 0.24        | + 0.04  | 0.24        | + 0.04  |
| Effective accuracy - Coil only (hall effect clamps)  | 0.45        | + 0.42  | 0.45         | + 0.42  | 0.45        | + 0.42  | 0.45        | + 0.42  |
| Total uncertainty with 3050 (All clamps)   | 0.48        | + 0.44  | 0.48         | + 0.44  | 0.49        | + 0.44  | 0.53        | + 0.45  |
| Total uncertainty with 3041 (wound clamps)   | 0.25        | + 0.06  | 0.26         | + 0.06  | 0.26        | + 0.06  | 0.28        | + 0.07  |
| Total uncertainty with 3041 (hall effect clamps)   | 0.46        | + 0.44  | 0.46         | + 0.44  | 0.46        | + 0.44  | 0.47        | + 0.45  |
| Total uncertainty with 3010 calibrator (wound clamps)  | 0.25        | + 0.042 | 0.25         | + 0.042 | 0.25        | + 0.042 | 0.26        | + 0.042 |
| Total uncertainty with 3010 (hall effect clamps)   | 0.45        | + 0.42  | 0.46         | + 0.42  | 0.46        | + 0.42  | 0.46        | + 0.42  |

Accuracy is dependant on proper alignment of the clamp meter within the coil

Certain clamp meters have alignment marks which should be aligned with the centre of the coil.

Certain types of clamp meter may have additional errors, or be outside the range which can be driven by the 3041/3010A directly

Fuente: Transmille (s.f.).

**Figura C6**

*Especificaciones técnicas del termohigrómetro CENTER 342.*

**SPECIFICATIONS**

|  |
|--|
| Measurement Temperature: -30~70°C, -22~158°F       |
| Measurement Humidity: 5%~98%RH                     |
| Accuracy: ±0.7°C ; ±3%RH                           |
| Resolution: 0.1°C ; 0.1°F ; 0.1%RH                 |
| Battery: 1.5V size AAA battery x 2                 |
| Dimensions:  |
| Recorder: 92 x 55 x 22 mm                          |
| Hanger: 106.5 x 59 x 25.5 mm                       |
| CENTER345 (Communication Base): 107.5 x 62 x 28 mm |



Fuente: Center Technology Corp. (2022).

## Anexo D. Certificados de calibración del equipamiento

### Figura D1

Resultados del certificado de calibración del calibrador para corriente DC.

#### DC CURRENT

|             |             |            |        |         |      |
|-------------|-------------|------------|--------|---------|------|
| 200uA Range | 0.0000uA    | -0.0004uA  | ± 30nA | ± 13pA  | Pass |
| 200uA Range | 100.0000uA  | 99.9913uA  | ± 40nA | ± 1.4nA | Pass |
| 200uA Range | 200.0000uA  | 199.9897uA | ± 50nA | ± 6.5nA | Pass |
| 200uA Range | -100.0000uA | -99.9990uA | ± 40nA | ± 1.4nA | Pass |



Certificate Number

AC-26128

Page 6 of 17

## CERTIFICATE OF CALIBRATION

#### AS FOUND RESULTS

| Test Title  | Applied Value | Reading     | Tolerance | Uncertainty | Pass / Fail |
|-------------|---------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| 200uA Range | -200.0000uA   | -200.0073uA | ± 50nA    | ± 6.5nA     | Pass        |
| 2mA Range   | 0.210000mA    | 0.210005mA  | ± 56.8nA  | ± 6.6nA     | Pass        |
| 2mA Range   | 1.000000mA    | 1.000030mA  | ± 120nA   | ± 14nA      | Pass        |
| 2mA Range   | 2.000000mA    | 2.000089mA  | ± 200nA   | ± 73nA      | Pass        |
| 2mA Range   | -1.000000mA   | -1.000017mA | ± 120nA   | ± 14nA      | Pass        |
| 2mA Range   | -2.000000mA   | -2.000085mA | ± 200nA   | ± 73nA      | Pass        |
| 20mA Range  | 5.000000mA    | 5.00007mA   | ± 550nA   | ± 110nA     | Pass        |
| 20mA Range  | 10.000000mA   | 10.00013mA  | ± 800nA   | ± 160nA     | Pass        |
| 20mA Range  | 20.000000mA   | 19.99982mA  | ± 1.3uA   | ± 0.3uA     | Pass        |
| 20mA Range  | -5.000000mA   | -4.99993mA  | ± 550nA   | ± 110nA     | Pass        |
| 20mA Range  | -10.000000mA  | -9.99996mA  | ± 800nA   | ± 160nA     | Pass        |
| 20mA Range  | -20.000000mA  | -20.00046mA | ± 1.3uA   | ± 0.3uA     | Pass        |
| 200mA Range | 100.00000mA   | 99.9937mA   | ± 11uA    | ± 1.4uA     | Pass        |
| 200mA Range | 200.00000mA   | 199.9878mA  | ± 19uA    | ± 3uA       | Pass        |
| 200mA Range | -100.00000mA  | -99.9917mA  | ± 11uA    | ± 1.4uA     | Pass        |
| 200mA Range | -200.00000mA  | -199.9911mA | ± 19uA    | ± 3uA       | Pass        |
| 2A Range    | 1.000000A     | 0.999979A   | ± 185uA   | ± 15uA      | Pass        |
| 2A Range    | 2.000000A     | 1.999975A   | ± 335uA   | ± 40uA      | Pass        |
| 2A Range    | -1.000000A    | -0.999985A  | ± 185uA   | ± 15uA      | Pass        |
| 2A Range    | -2.000000A    | -1.999988A  | ± 335uA   | ± 40uA      | Pass        |
| 30A Range   | 10.00000A     | 9.99938A    | ± 4.3mA   | ± 0.7mA     | Pass        |
| 30A Range   | 20.00000A     | 19.99841A   | ± 8.3mA   | ± 1.4mA     | Pass        |
| 30A Range   | 30.00000A     | 30.00307A   | ± 12.3mA  | ± 2.1mA     | Pass        |
| 30A Range   | -30.00000A    | -30.00349A  | ± 12.3mA  | ± 2.1mA     | Pass        |
| 30A Range   | -20.00000A    | -20.00248A  | ± 8.3mA   | ± 1.4mA     | Pass        |
| 30A Range   | -10.00000A    | -9.99984A   | ± 4.3mA   | ± 0.7mA     | Pass        |

## Figura D2

Resultados del certificado de calibración del calibrador para corriente AC.

### AC CURRENT

|                  |           |           |         |         |      |
|------------------|-----------|-----------|---------|---------|------|
| 200uA Rng: 40Hz  | 25.000uA  | 24.971uA  | ± 300nA | ± 130nA | Pass |
| 200uA Rng: 206Hz | 25.000uA  | 24.966uA  | ± 270nA | ± 130nA | Pass |
| 200uA Rng: 10kHz | 25.000uA  | 24.952uA  | ± 450nA | ± 210nA | Pass |
| 200uA Rng: 10Hz  | 200.000uA | 199.977uA | ± 650nA | ± 280nA | Pass |
| 200uA Rng: 40Hz  | 200.000uA | 200.065uA | ± 650nA | ± 160nA | Pass |
| 200uA Rng: 56Hz  | 200.000uA | 200.046uA | ± 390nA | ± 160nA | Pass |
| 200uA Rng: 1kHz  | 200.000uA | 200.001uA | ± 1.8uA | ± 0.7uA | Pass |
| 200uA Rng: 10kHz | 200.000uA | 200.170uA | ± 1.8uA | ± 0.7uA | Pass |
| 2mA Rng: 40Hz    | 0.21000mA | 0.21006mA | ± 920nA | ± 160nA | Pass |



Certificate Number  
AC-26128

Page 7 of 17

## CERTIFICATE OF CALIBRATION

### AS FOUND RESULTS

| Test Title       | Applied Value | Reading   | Tolerance | Uncertainty | Pass / Fail |
|------------------|---------------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| 2mA Rng: 206Hz   | 0.21000mA     | 0.21004mA | ± 526nA   | ± 160nA     | Pass        |
| 2mA Rng: 10kHz   | 0.21000mA     | 0.21021mA | ± 2.2uA   | ± 0.6uA     | Pass        |
| 2mA Rng: 10Hz    | 2.00000mA     | 1.99976mA | ± 4.5uA   | ± 1.4uA     | Pass        |
| 2mA Rng: 40Hz    | 2.00000mA     | 2.00036mA | ± 4.5uA   | ± 0.6uA     | Pass        |
| 2mA Rng: 56Hz    | 2.00000mA     | 2.00020mA | ± 1.6uA   | ± 0.6uA     | Pass        |
| 2mA Rng: 1kHz    | 2.00000mA     | 2.00007mA | ± 1.9uA   | ± 0.6uA     | Pass        |
| 2mA Rng: 10kHz   | 2.00000mA     | 1.99973mA | ± 14.7uA  | ± 3.3uA     | Pass        |
| 20mA Rng: 40Hz   | 2.1000mA      | 2.0997mA  | ± 9.2uA   | ± 0.6uA     | Pass        |
| 20mA Rng: 206Hz  | 2.1000mA      | 2.1001mA  | ± 5.3uA   | ± 0.6uA     | Pass        |
| 20mA Rng: 10kHz  | 2.1000mA      | 2.0994mA  | ± 17.5uA  | ± 3.4uA     | Pass        |
| 20mA Rng: 56Hz   | 10.0000mA     | 9.9988mA  | ± 10uA    | ± 2.4uA     | Pass        |
| 20mA Rng: 10Hz   | 20.0000mA     | 19.9922mA | ± 45uA    | ± 10uA      | Pass        |
| 20mA Rng: 40Hz   | 20.0000mA     | 19.9909mA | ± 45uA    | ± 2.7uA     | Pass        |
| 20mA Rng: 1kHz   | 20.0000mA     | 19.9941mA | ± 19uA    | ± 3uA       | Pass        |
| 20mA Rng: 10kHz  | 20.0000mA     | 19.9915mA | ± 107uA   | ± 3uA       | Pass        |
| 200mA Rng: 40Hz  | 21.000mA      | 20.987mA  | ± 92uA    | ± 2.8uA     | Pass        |
| 200mA Rng: 206Hz | 21.000mA      | 20.992mA  | ± 52.6uA  | ± 2.8uA     | Pass        |
| 200mA Rng: 10kHz | 21.000mA      | 20.991mA  | ± 196uA   | ± 3uA       | Pass        |
| 200mA Rng: 10Hz  | 200.000mA     | 199.908mA | ± 450uA   | ± 110uA     | Pass        |
| 200mA Rng: 40Hz  | 200.000mA     | 199.893mA | ± 450uA   | ± 50uA      | Pass        |
| 200mA Rng: 56Hz  | 200.000mA     | 199.934mA | ± 160uA   | ± 50uA      | Pass        |
| 200mA Rng: 1kHz  | 200.000mA     | 199.936mA | ± 190uA   | ± 50uA      | Pass        |
| 200mA Rng: 10kHz | 200.000mA     | 199.931mA | ± 1.3mA   | ± 82uA      | Pass        |
| 2A Rng: 40Hz     | 0.21000A      | 0.20990A  | ± 920uA   | ± 53uA      | Pass        |
| 2A Rng: 206Hz    | 0.21000A      | 0.20995A  | ± 589uA   | ± 53uA      | Pass        |
| 2A Rng: 5kHz     | 0.21000A      | 0.21004A  | ± 2mA     | ± 61uA      | Pass        |
| 2A Rng: 10Hz     | 2.00000A      | 1.99937A  | ± 4.5mA   | ± 1.0mA     | Pass        |
| 2A Rng: 40Hz     | 2.00000A      | 1.99907A  | ± 4.5mA   | ± 0.3mA     | Pass        |
| 2A Rng: 56Hz     | 2.00000A      | 1.99912A  | ± 2.2mA   | ± 0.3mA     | Pass        |
| 2A Rng: 1kHz     | 2.00000A      | 1.99919A  | ± 2.5mA   | ± 0.3mA     | Pass        |
| 2A Rng: 5kHz     | 2.00000A      | 1.99881A  | ± 12.7mA  | ± 0.4mA     | Pass        |
| 30A Rng: 40Hz    | 2.10000A      | 2.09796A  | ± 9.2mA   | ± 0.3mA     | Pass        |
| 30A Rng: 206Hz   | 2.10000A      | 2.09893A  | ± 3.9mA   | ± 0.3mA     | Pass        |
| 30A Rng: 10Hz    | 20.00000A     | 19.98809A | ± 45mA    | ± 10mA      | Pass        |
| 30A Rng: 40Hz    | 20.00000A     | 19.98655A | ± 45mA    | ± 3.2mA     | Pass        |
| 30A Rng: 56Hz    | 20.00000A     | 19.99408A | ± 20mA    | ± 3.2mA     | Pass        |
| 30A Rng: 100Hz   | 20.00000A     | 19.98812A | ± 22mA    | ± 3.2mA     | Pass        |
| 30A Rng: 1kHz    | 20.00000A     | 19.99328A | ± 64mA    | ± 3.2mA     | Pass        |
| 30A Rng: 56Hz    | 30.00000A     | 29.99759A | ± 20mA    | ± 4.8mA     | Pass        |

## **Anexo E. Registro de validación manual de hoja de cálculo.**

*Se calibró una pinza amperimétrica de la marca Peak Teach modelo 1670 que mide corrientes AC y DC de hasta 1000 A. Según el fabricante, su temperatura de funcionamiento es de 5 °C hasta 40 °C con una humedad relativa menor al 80 % RH.*

*El punto de calibración para este ejemplo será de 1000 A para la función de corriente continua, en donde la resolución del IC es de 0,01 A.*

*La calibración se realizó con el calibrador multifunción que cuenta con un alcance de corriente continua y alterna hasta 20 A. Debido a que el punto de calibración sobrepasa la corriente máxima que puede entregar el patrón, la calibración se realizó empleando el calibrador multifunción en conjunto con la estación de trabajo (bobina de 50 vueltas). Por tanto, se configuró la salida del calibrador multifunción para que entregara un valor de 20 A, por el efecto multiplicador de la bobina de 50 vueltas, se obtuvo el valor deseado de 1000 A (20,00 A X 50).*

*Según la información en el certificado de calibración del calibrador multifunción, para la función corriente continua y para el valor de 20 A presenta un error de 0,001590083 A, por lo tanto, la corrección del patrón es ( $\delta I_{PC} = -0,001590083$  A) y una incertidumbre expandida de 0,001411 A ( $U_p = 0,001411$  A) con factor de cobertura  $k = 2$  para un nivel de confianza de aproximadamente 95 %.*

*Por otro lado, según el manual del calibrador multifunción las especificaciones técnicas a un año para la función corriente continua en el rango de 2 a 30 A es de (0,04 % set + 350  $\mu$ A).*

*Entonces para obtener el aporte de las especificaciones en unidad de Amperes (A) es necesario multiplicar 0,04 % set por el valor de salida (en este caso 20 A) y adicionar 350  $\mu$ A. Obteniéndose:*

$$S_{\text{calibrador}} = \frac{0,04}{100} \times (20 \text{ A}) + \frac{350 \text{ A}}{1000000} = 0,00835 \text{ A}$$

Debido a que se está utilizando una bobina de corriente multiplicadora para realizar la calibración, se consideró la contribución de la carga o el efecto que se genera cuando se utiliza en conjunto con el calibrador multifunción. En esa situación se adicionó a las especificaciones del calibrador, las especificaciones debido a la interacción de la pinza y la bobina de corriente con el calibrador.

Según la información técnica proporcionada por el fabricante, la bobina de corriente presenta unas especificaciones de  $\pm (0,46 \% + 0,44 \text{ A})$ . Por ello, para obtener el aporte de las especificaciones de la bobina de corriente en unidades de Amperes (A), se multiplica el 0,46% por el valor de salida (en ese caso 1000 A) y adicionar 0,44 A.

$$S_{\text{bobina}} = \frac{0,46}{100} \times (1000 \text{ A}) + 0,44 \text{ A} = 5,04 \text{ A}$$

Con los valores obtenidos se puede calcular la especificación del conjunto calibrador y bobina:

$$\begin{aligned} \text{espec.} &= \sqrt{(n \times S_{\text{calibrador}})^2 + (S_{\text{bobina}})^2} = \sqrt{(50 \times 0,00835 \text{ A})^2 + (5,04 \text{ A})^2} \\ \text{espec.} &= 5,0573 \text{ A} \end{aligned}$$

Antes de realizar la calibración se revisó que la batería de la pinza amperimétrica se encontrara en perfectas condiciones para su uso (al menos 85 % de su carga) y que sus fusibles se encontraban en buenas condiciones para su uso.

La calibración se realizó en las siguientes condiciones ambientales:

Temperatura y humedad relativa del ambiente inicial: 22,1 °C; 56,5 %

Temperatura y humedad relativa del ambiente final: 23,2 °C; 57,3 %

Usando los cables adecuados se realizó la conexión del calibrador multifunción y la estación de trabajo, para luego ubicar la pinza amperimétrica en el centro de la bobina de 50 vueltas.

Luego, con el calibrador multifunción se seleccionó el valor de 20,00 A, este valor se aplicó a la estación de trabajo (bobina de 50 vueltas), observándose en la pantalla de la pinza amperimétrica, las siguientes lecturas.

998,12 A - 998,13 A - 998,13 A - 998,13 A - 998,14 A

Siendo el valor promedio de la lectura de la pinza amperimétrica de 998,13 A.

El error  $e_M$ , de la indicación obtenida en el multímetro a calibrar se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$e_M = (I_M + \delta I_M + \delta I_{MT}) - (n \times (I_P + \delta I_{PC}) + \delta I_{PME})$$

El valor más probable de las correcciones  $\delta I_M, \delta I_{MT}, \delta I_{M0}, \delta I_{PME}$  es nula pero sus respectivas incertidumbres no lo son. Entonces se tiene:

$$e_M = (998,13 \text{ A} + 0 \text{ A} + 0 \text{ A}) - (50 \times (20 \text{ A} - 0,001590083 \text{ A}) + 0 \text{ A})$$

$$e_M = (998,13 \text{ A} - 999,92 \text{ A}) = -1,79 \text{ A}$$

Luego de obtener los datos se realizó el cálculo de la incertidumbre de la medición.

Analizando cada una de las contribuciones se tiene:

1. Contribución debida a la variación de las lecturas de pinza amperimétrica a calibrar.

$$u(I_M) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (I_{Mi} - \bar{I}_M)^2}}{\sqrt{n}} = \frac{0,0070710 \text{ A}}{\sqrt{5}} = 0,0031622 \text{ A}$$

2. Contribución debida a la resolución de la pinza a calibrar.

Como  $a = 0,01 \text{ A}$ , por medio de la ecuación se tiene:

$$u(\delta I_M) = \frac{a}{2\sqrt{3}} = \frac{0,01 \text{ A}}{2\sqrt{3}} = 0,002886 \text{ A}$$

3. Contribución debida a la influencia de temperatura de la pinza amperimétrica.

Como la calibración se realizó dentro del margen de temperatura de referencia de la pinza amperimétrica a calibrar, no se consideró.

4. Contribución de la señal aplicada del calibrador debido a la calibración.

Según el certificado de calibración del patrón utilizado se tiene que  $U_p = 0,001411 \text{ A}$  con un factor de cobertura  $k = 2$ . Entonces se tiene:

$$u(\delta I_{PC}) = \frac{U_p}{k} = \frac{0,001411 \text{ A}}{2} = 0,0007055 \text{ A}$$

5. Contribución de la señal aplicada del calibrador debida a múltiples efectos.

Según las especificaciones técnicas del conjunto calibrador y bobina se tiene que:  $espec. = 5,0573 \text{ A}$ . Entonces:

$$u(\delta I_{PME}) = \frac{espec.}{\sqrt{3}} = \frac{5,0573 \text{ A}}{\sqrt{3}} = 2,91983 \text{ A}$$

6. Los coeficientes de sensibilidad se calculan como las derivadas parciales de  $e_M$ , respecto de cada una de las magnitudes evaluadas en el punto de calibración considerado.

$$c_1 = \frac{\partial e_M}{\partial I_M} = 1 ; c_2 = \frac{\partial e_M}{\partial \delta I_M} = 1 ; c_3 = \frac{\partial e_M}{\partial \delta I_{MT}} = 1$$

$$c_4 = \frac{\partial e_M}{\partial \delta I_{PC}} = -50 ; c_5 = \frac{\partial e_M}{\partial \delta I_{PME}} = -1$$

7. La incertidumbre estándar combinada se calcula de la siguiente manera:

$$u_c^2(y) = 0,0031622^2 + 0,002886^2 + 0^2 + 50^2 \times 0,0007055^2 + 2,91983^2$$

$$u_c(y) = 2,9200 \text{ A}$$

8. Calculando los grados efectivos de libertad

$$v_{\text{eff}} = \frac{2,9200^4(y)}{\frac{0,0031622^4}{4} + \frac{0,002886^4}{\infty} + \frac{0^4}{\infty} + \frac{0,0007055^4}{60} + \frac{2,91983^4}{\infty}}$$

$$v_{\text{eff}} = 2813642637,08822$$

Debido al valor tan elevado de los grados de libertad para un nivel de confianza del 95,45%, según la tabla G-2 de la GUM el valor de  $k=2,00$ .

9. La incertidumbre expandida sería:

$$U = 2,9200 \text{ A} \times (2,00) = 5,84 \text{ A}$$

Según el apartado 7.2.6 de la GUM, la incertidumbre se redondea con 2 cifras significativas, por ello el resultado final sería 5,8 A, así mismo el error de medición se redondea con la misma cantidad de decimales que la incertidumbre.

10. El error de la pinza amperimétrica es:

$$E = (-1,8 \text{ A} \pm 5,8 \text{ A})$$

Donde el valor que sigue al símbolo  $\pm$  es la incertidumbre expandida de calibración, la cual es igual a la incertidumbre estándar multiplicada por el factor de cobertura  $k=2,00$ , que para una distribución normal corresponde a un nivel de confianza del 95,45% aproximadamente.

## Anexo F. Código fuente para la validación de hoja de cálculo en MATLAB.

```
%CALCULO DE ERROR E INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN
%PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE PINZAS AMPERIMÉTRICAS
clc
clear all
res=input('Ingresar resolución del IC: ')
coil=input('Ingresar # de vueltas de bobina: ')
nom=input('Ingresar valor configurado en el calibrador: ')
l1=998.12;
l2=998.13;
l3=998.13;
l4=998.13;
l5=998.14;
prom=(l1+l2+l3+l4+l5)/5;

%información del certificado de calibración
up=0.001411;
ipc=-0.001590083;
%*****
%información técnica del calibrador
v1=0.04/100;
v2=350e-6;
scal=v1*nom+v2
%Información técnica d la bobina
v3=0.46/100;
v4=0.44;
sbob=v3*coil*nom+v4
%Especificación
espec=sqrt((coil*scal)^2+(sbob)^2);
%*****
%Error de medición
em=prom-(coil*(nom+ipc));

%*****INCERTIDUMBRE TIPICAS*****
% 1. Variación de las lecturas
A=[l1 l2 l3 l4 l5];
uim=std(A)/sqrt(5);
% 2. Resolución del IC
uimres=res/sqrt(12);
% 3. Influencia de la temperatura
utemp=0;
% 4. Incertidumbre de patron
uipc=up/2;
% 5.Multiples efectos
uipme=espec/sqrt(3);

%*****COEFICIENTES DE SENSIBILIDAD***
```

```

c1=1;      %repetibilidad
c2=1;      %resolución
c3=1;      %temperatura
c4=-coil;  %patron
c5=-1;     %multiples efectos

%***INCERTIDUMBRE ESTANDAR COMBINADA****
ucy=sqrt((c1*uim)^2+(c2*uimres)^2+(c3*utemp)^2+(c4*uipc)^2+(c5*uipme)^2);

%***GRADOS EFECTIVOS DE LIBERTAD***
veef=ucy^4/((uim^4/4)+(uipc^4/60));
% Factor de cobertura
k=2;
%****INCERTIDUMBRE EXPANDIDA****
uexp=ucy*k

fprintf(1,'%s\n','EL ERROR DE LA PINZA AMPERIMÉTRICA ES:');
X1 = [num2str(em), ' +/- ',num2str(uexp), ' A'];
disp(X1)
fprintf(1,'%s\n','Según el apartado 7.2.6 de la GUM, la incertidumbre se
redondea con 2 cifras significativas');
fprintf(1,'%s\n','así mismo el error de medición se redondea con la misma
cantidad de decimales que la incertidumbre');
r1=round(em,1);
r2 = round(uexp,1);
X2 = ['El resultado es: ', '(' ,num2str(r1), ' +/- ',num2str(r2), ') A'];
disp(X2)

```

## Anexo G. Modelo de certificado de calibración de pinza amperimétrica.

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN No: REFERENCIAL

|   |   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
|---|---|----------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------------|
|    |   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| <b>IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE</b>   |   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| NOMBRE:   | EMPRESA REFERENCIAL   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| DIRECCIÓN:  | DIRECCION REFERENCIAL   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| TELÉFONO:   | TELEFONO REFERENCIAL  |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| PERSONA(S) DE CONTACTO:   | PERSONA REFERENCIAL   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| <b>IDENTIFICACIÓN DEL ÍTEM DE CALIBRACIÓN</b>   |   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| ÍTEM:   | PINZA AMPERIMÉTRICA   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| MARCA <sup>(2)</sup> :  | PEAKTEACH   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| MODELO <sup>(2)</sup> :   | P 1670  |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| SERIE <sup>(2)</sup> :  | 254687  |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| CÓDIGO:   | LABE-012  |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| UBICACIÓN <sup>(1)</sup> :  | LABORATORIO ELECTRICO DE CALIDAD  |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| <b>EQUIPAMIENTO UTILIZADO</b>   |   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| <b>CÓDIGO</b>   | <b>NOMBRE</b>   | <b>MARCA</b>               | <b>MODELO</b>      | <b>SERIE</b>             | <b>VENCE CAL.</b> | <b>N° CERTIFICADO</b> |                                |
| ELP.PT.042  | CALIBRADOR MULTIFUNCION   | TRANSMILLE                 | 3041A              | L1510F18                 | 2022-12-08        | AC-26128              |                                |
| ELP.PT.043  | ESTACIÓN DE TRABAJO MULTIFUNCION  | TRANSMILLE                 | EA015              | 112446G18                | 2022-12-08        | AC-26130              |                                |
| ELP.PT.036  | TERMOHIGROMETRO   | CENTER                     | 342                | 180303334                | 2022-08-03        | CCP-0731-003-21       |                                |
| <b>DECLARACIÓN DE TRAZABILIDAD METROLÓGICA</b>  |   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| Los resultados de calibración contenidos en este informe son trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI) por medio de una cadena ininterrumpida de calibraciones a través del NPL (National Physical Laboratory – Reino Unido) o de otros Institutos Nacionales de Metrología (INMs).   |   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| <b>CALIBRACIÓN</b>  |   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| MÉTODO:   | COMPARACIÓN INDIRECTA CON CALIBRADOR MULTIFUNCIÓN Y ESTACIÓN DE TRABAJO |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| DOCUMENTO DE REFERENCIA:  | PC-025. INACAL. PRIMERA EDICIÓN DIGITAL. ENERO 2019.                    |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| PROCEDIMIENTO:  | PEC.EL.34   | TEMPERATURA AMBIENTAL:     | 22,1 °C ± 0,0 °C   |                          |                   |                       |                                |
| LUGAR DE CALIBRACIÓN:   | LABORATORIO 1 - ELICROM   | HUMEDAD RELATIVA:          | 56,7 %HR ± 0,3 %HR |                          |                   |                       |                                |
| <b>RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN</b>   |   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| <b>Función Corriente Alterna</b>  |   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| <b>Patrón</b>   |   | <b>Ítem de Calibración</b> |                    | <b>Resultados</b>        |                   |                       |                                |
| <b>Aplicada</b>   | <b>Corregida</b>  | <b>Rango</b>               | <b>Resolución</b>  | <b>Lectura</b>           | <b>Error</b>      | <b>Incertidumbre</b>  | <b>Factor de cobertura (k)</b> |
| 20,00 A   | 19,99 A   | 50,00 A                    | 0,01 A             | 20,00 A                  | 0,01 A            | 0,14 A                | 2,00                           |
| 25,00 A   | 24,99 A   |                            | 0,01 A             | 25,00 A                  | 0,01 A            | 0,15 A                | 2,00                           |
| 30,00 A   | 29,99 A   |                            | 0,01 A             | 30,00 A                  | 0,01 A            | 0,17 A                | 2,00                           |
| 35,00 A   | 34,99 A   |                            | 0,01 A             | 35,00 A                  | 0,01 A            | 0,18 A                | 2,00                           |
| 45,00 A   | 44,98 A   |                            | 0,01 A             | 45,00 A                  | 0,02 A            | 0,22 A                | 2,00                           |
| 50,00 A   | 49,98 A   | 1000,00 A                  | 0,01 A             | 50,00 A                  | 0,02 A            | 0,23 A                | 2,00                           |
| 60,00 A   | 59,98 A   |                            | 0,01 A             | 60,00 A                  | 0,02 A            | 0,26 A                | 2,00                           |
| 70,00 A   | 69,97 A   |                            | 0,01 A             | 70,00 A                  | 0,03 A            | 0,30 A                | 2,00                           |
| 80,00 A   | 79,97 A   |                            | 0,01 A             | 80,00 A                  | 0,03 A            | 0,33 A                | 2,00                           |
| 90,00 A   | 89,96 A   |                            | 0,01 A             | 90,00 A                  | 0,04 A            | 0,36 A                | 2,00                           |
| 100,00 A  | 99,96 A   | 1000,00 A                  | 0,01 A             | 100,00 A                 | 0,04 A            | 0,43 A                | 2,00                           |
| 200,00 A  | 199,93 A  |                            | 0,01 A             | 200,00 A                 | 0,07 A            | 0,74 A                | 2,00                           |
| 300,00 A  | 299,9 A   |                            | 0,01 A             | 300,00 A                 | 0,1 A             | 1,1 A                 | 2,00                           |
| 400,00 A  | 399,9 A   |                            | 0,01 A             | 400,00 A                 | 0,1 A             | 1,4 A                 | 2,00                           |
| 500,00 A  | 499,8 A   |                            | 0,01 A             | 500,00 A                 | 0,2 A             | 1,7 A                 | 2,00                           |
| <b>OBSERVACIONES</b>  |   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición (intervalo de confianza), la cual se evaluó con base en el documento JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections) "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement", multiplicando la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k, que para una distribución t (de Student) corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente el 95,45%. Este certificado no podrá reproducirse excepto en su totalidad sin la aprobación escrita del laboratorio Elicrom-Calibración. Los resultados contenidos en este certificado son válidos únicamente para el ítem aquí descrito, en el momento y bajo las condiciones en que se realizó la calibración. |   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| <b>NOTA 1:</b> La lectura del patrón y el error de medición (mejor estimación del valor verdadero) se muestran con la misma cantidad de decimales que la incertidumbre reportada (véase 7.2.6 de la GUM).   |   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| <sup>(1)</sup> Información proporcionada por el cliente. Elicrom no es responsable de dicha información.  |   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| <sup>(2)</sup> Información tomada de las especificaciones del ítem de calibración (proporcionada por el fabricante).  |   |                            |                    |                          |                   |                       |                                |
| <b>CALIBRACIÓN REALIZADA POR:</b>   |   | José Ferro                 |                    |                          |                   |                       |                                |
| <b>FECHA DE RECEPCIÓN DEL ÍTEM:</b>   |   | 2021-03-22                 |                    | <b>FECHA DE EMISIÓN:</b> |                   | 2023-05-04            |                                |
| <b>FECHA DE CALIBRACIÓN:</b>  |   | 2021-03-22                 |                    |                          |                   |                       |                                |

**ANEXO H. Tabla G.2 de la GUM.**

| Grados de libertad | Fracción $p$ (%)    |       |       |                     |       |                     |
|--------------------|---------------------|-------|-------|---------------------|-------|---------------------|
|                    | 68,27 <sup>a)</sup> | 90    | 95    | 95,45 <sup>a)</sup> | 99    | 99,73 <sup>a)</sup> |
| $\nu$              |                     |       |       |                     |       |                     |
| 1                  | 1,84                | 6,31  | 12,71 | 13,97               | 63,66 | 235,80              |
| 2                  | 1,32                | 2,92  | 4,30  | 4,53                | 9,92  | 19,21               |
| 3                  | 1,20                | 2,35  | 3,18  | 3,31                | 5,84  | 9,22                |
| 4                  | 1,14                | 2,13  | 2,78  | 2,87                | 4,60  | 6,62                |
| 5                  | 1,11                | 2,02  | 2,57  | 2,65                | 4,03  | 5,51                |
| 6                  | 1,09                | 1,94  | 2,45  | 2,52                | 3,71  | 4,90                |
| 7                  | 1,08                | 1,89  | 2,36  | 2,43                | 3,50  | 4,53                |
| 8                  | 1,07                | 1,86  | 2,31  | 2,37                | 3,36  | 4,28                |
| 9                  | 1,06                | 1,83  | 2,26  | 2,32                | 3,25  | 4,09                |
| 10                 | 1,05                | 1,81  | 2,23  | 2,28                | 3,17  | 3,96                |
| 11                 | 1,05                | 1,80  | 2,20  | 2,25                | 3,11  | 3,85                |
| 12                 | 1,04                | 1,78  | 2,18  | 2,23                | 3,05  | 3,76                |
| 13                 | 1,04                | 1,77  | 2,16  | 2,21                | 3,01  | 3,69                |
| 14                 | 1,04                | 1,76  | 2,14  | 2,20                | 2,98  | 3,64                |
| 15                 | 1,03                | 1,75  | 2,13  | 2,18                | 2,95  | 3,59                |
| 16                 | 1,03                | 1,75  | 2,12  | 2,17                | 2,92  | 3,54                |
| 17                 | 1,03                | 1,74  | 2,11  | 2,16                | 2,90  | 3,51                |
| 18                 | 1,03                | 1,73  | 2,10  | 2,15                | 2,88  | 3,48                |
| 19                 | 1,03                | 1,73  | 2,09  | 2,14                | 2,86  | 3,45                |
| 20                 | 1,03                | 1,72  | 2,09  | 2,13                | 2,85  | 3,42                |
| 25                 | 1,02                | 1,71  | 2,06  | 2,11                | 2,79  | 3,33                |
| 30                 | 1,02                | 1,70  | 2,04  | 2,09                | 2,75  | 3,27                |
| 35                 | 1,01                | 1,70  | 2,03  | 2,07                | 2,72  | 3,23                |
| 40                 | 1,01                | 1,68  | 2,02  | 2,06                | 2,70  | 3,20                |
| 45                 | 1,01                | 1,68  | 2,01  | 2,06                | 2,69  | 3,18                |
| 50                 | 1,01                | 1,68  | 2,01  | 2,05                | 2,68  | 3,16                |
| 100                | 1,005               | 1,660 | 1,984 | 2,025               | 2,626 | 3,077               |
| $\infty$           | 1,000               | 1,645 | 1,960 | 2,000               | 2,576 | 3,000               |

a) Para una magnitud  $z$  descrita por una distribución normal de esperanza matemática  $\mu_z$  y desviación típica  $\sigma$ , el intervalo  $\mu_z \pm k\sigma$  comprende respectivamente las fracciones  $p = 68,27\%$ ;  $95,45\%$  y  $99,73\%$  de la distribución, para los valores  $k = 1, 2$  y  $3$ .