

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS**

**PROYECTO DE TITULACIÓN**

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

**“MAGÍSTER EN ESTADÍSTICA CON MENCIÓN EN GESTIÓN DE  
LA CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD”**

**TEMA:**

**“ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN EL ENSAYO DE  
CAPACIDAD DE 20 h REALIZADO EN BATERÍAS DE PLOMO-  
ÁCIDO DE 12 V”**

**AUTOR:**

**KIANA ANNABEL AÑAZCO CAMACHO**

Guayaquil - Ecuador

2021

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar la estimación de la incertidumbre para el cumplimiento del requisito 5.4.6, de la norma ISO/IEC 17025:2017, titulado "Estimación de la incertidumbre de la medición", el cual establece que se requiere la determinación de la incertidumbre de la medición, que a diferencia del método de ensayo la incertidumbre es propia del laboratorio y debe ser calculada por cada ensayo que se realice. Para lograr este objetivo, se utilizó la "Guía para la expresión de la incertidumbre de medida" (GUM). Todo esto con la finalidad de contribuir en el proceso de acreditación, debido a que, en Ecuador no existen laboratorios acreditados que realicen ensayos eléctricos a baterías de plomo-ácido de 12 V. Por lo tanto, este estudio constituye un gran reto al contribuir con la empresa para obtener la acreditación del laboratorio y, de esta manera, brindar confiabilidad en los resultados tanto al cliente interno como al externo.

Palabras claves:

Incertidumbre, ensayo eléctrico, baterías, acreditación

## **ABSTRACT**

The objective of this work is to develop the estimation of the uncertainty for the fulfillment of requirement 5.4.6, of the ISO / IEC 17025: 2017 standard, called "Estimation of the uncertainty of measurement", which establishes that the determination is required of the measurement uncertainty, which unlike the test method, the uncertainty is specific for the laboratory and must be calculated for each test that is carried out. To achieve this objective, the "Guide for the expression of uncertainty of measurement" (GUM) was used. All this with the purpose of contributing to the accreditation process, because, in Ecuador, there are no accredited laboratories that perform electrical tests on 12 V lead-acid batteries. Therefore, this study constitutes a great challenge in contributing with the company to obtain the laboratory's accreditation and, in this way, provide reliability in the results to both internal and external clients.

Keywords:

Uncertainty, electrical test, battery, accreditation

## **DEDICATORIA**

Este trabajo va dedicado a mis padres: Clotario Añezco y Fanny Camacho; quienes con amor, esfuerzo y dedicación me han dado las mejores enseñanzas, vivencias, valores y principios.

A mi hermano Geovanny Granda, quién es mi inspiración, quién me apoyó en este reto, quién cree en mí, me escucha, motiva y admira. Eres mi ángel.

A mis sobrinas Danna y Denis, que con su amor me hacen creer que todo es posible. Gracias por verme como su ejemplo. Amo verlas crecer cada día.

A mi Jefe, Dimas Pincay, por ser mi mentor, por ayudarme y guiarme en mi desarrollo profesional y personal. Es maravilloso que la vida me haya permitido conocerlo y poder trabajar en equipo.

A mi novio Andrés Castillo, porque me enseña cada día que el amor existe y que tener un amor sano, bonito y que sume; es posible.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por darme sabiduría, bendecirme y guiar mi camino.

A mis padres, por ser mi motor, por creer y confiar en mí.

A mi hermano, por ayudarme e inspirarme siempre.

A Dimas, por su liderazgo y enseñanzas que han marcado un antes y un después en mi vida profesional y personal.

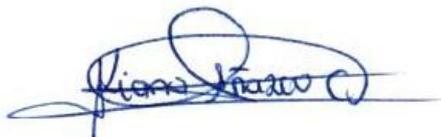
A mi tutora Diana, por la atención y guía brindada durante la ejecución de este trabajo.

A Tecnova, por darme la apertura para la ejecución del presente proyecto.

## DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Titulación, me corresponde exclusivamente y ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría. El patrimonio intelectual del mismo, corresponde exclusivamente a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.



---

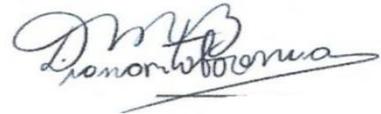
Kiana Annabel Añezco Camacho

# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



---

Francisco Vera Alcívar, Ph.D.  
PRESIDENTE



---

Mgtr. Diana Montalvo Barrera  
DIRECTOR



---

Sandra García Bustos, Ph.D.  
VOCAL 1



---

Mgtr. Diego Toscano Prieto  
VOCAL 2

## ABREVIATURAS O SIGLAS

AENOR	Asociación Española de Normalización
AIAG	Automotive Industry Action Group
Ah	Amperios hora
ANOVA	Análisis de la Varianza
BIPM	Oficina Internacional de Pesos y Medidas
CEM	Centro Español de Metrología
CEN	Comité Europeo de Normalización
CGPM	Conferencia General de Pesas y Medidas
EMC	Electromagnetic Compatibility
GUM	Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida
h	Hora
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
In	Corriente nominal
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
ISO	Organización Internacional de Estandarización
NBS	National Bureau of Standards
NIST	National Institute of Standards and Technology
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
R&R	Repetibilidad y Reproducibilidad
RTE	Reglamento Técnico Ecuatoriano
SAE	Servicio de Acreditación Ecuatoriana
SI	Sistema Internacional de Unidades
t	Tiempo
V	Voltio
VIM	Vocabulario internacional de términos

## TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Descripción del problema .....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivos Generales .....	4
1.3.2. Objetivos Específicos .....	5
1.4. Justificación.....	5
1.5. Hipótesis .....	6
1.6. Alcance .....	6
CAPÍTULO 2 .....	7
2. MARCO TEÓRICO .....	7
2.1. Estado del Arte .....	7
2.2. Marco teórico .....	8
2.2.1. Fundamentos metrológicos .....	8
2.2.1.1. Sistema internacional de unidades SI .....	9
2.2.1.1.1. Unidades básicas.....	9
2.2.1.1.2. Unidades derivadas.....	10
2.2.1.2. Historia de la metrología.....	11
2.2.1.3. Metrología .....	13
2.2.1.3.1. Metrología científica .....	14
2.2.1.3.2. Metrología industrial .....	14
2.2.1.3.3. Metrología legal.....	14
2.2.1.4. Vocabulario internacional de términos (VIM) .....	15
2.2.1.5. Mensurando .....	15
2.2.1.6. Medición .....	16
2.2.1.7. Incertidumbre.....	16
2.2.1.7.1. Incertidumbre típica combinada .....	17
2.2.1.7.2. Incertidumbre expandida .....	17
2.2.1.7.3. Factor de cobertura .....	18
2.2.1.8. Evaluación de la incertidumbre estándar.....	18

2.2.1.8.1.	Evaluación Tipo A.....	18
2.2.1.8.2.	Evaluación Tipo B.....	19
2.2.1.9.	Incertidumbre típica combinada .....	19
2.2.1.9.1.	Ley de la propagación de las incertidumbres.....	19
2.2.1.9.1.1.	Justificación para tratar de forma idéntica todas las componentes de la incertidumbre .....	19
2.2.1.10.	Incertidumbre expandida .....	23
2.2.1.10.1.	Elección del factor de cobertura.....	23
2.2.1.10.2.	Evaluación de la incertidumbre expandida.....	24
2.2.1.10.3.	Teorema del límite central.....	25
2.2.2.	Selección del método .....	27
2.2.3.	Validación de métodos .....	27
2.2.4.	Estudios R&R.....	30
2.2.4.1.	Estudio R&R corto.....	30.
2.2.5.	Batería.....	31
2.2.5.1.	Funcionamiento de batería.....	31
2.2.6.	Ensayos Eléctricos.....	32
2.2.6.1.	Capacidad de 20 h.....	32
2.2.6.2.	Capacidad de reserva .....	32
2.2.6.3.	Desempeño de Arranque en Frío.....	32
2.2.6.3.1.	Desempeño de Arranque en Frío a -18 °C – Opción 1 .....	33
2.2.6.3.2.	Desempeño de Arranque en Frío a -18 °C – Opción 2 .....	33
CAPÍTULO 3	.....	34
3.	METODOLOGÍA.....	34
3.1.	Elaboración del modelo matemático de la medición .....	37
3.2.	Identificación de fuentes de incertidumbre .....	39
3.3.	Evaluación de incertidumbre estándar .....	40
3.3.1.	Evaluación tipo A de la incertidumbre típica.....	41
3.3.2	Evaluación tipo B de la incertidumbre típica.....	44
3.3.2.1	Distribución de probabilidad.....	46
3.3.2.1.1	Distribución normal.....	47
3.3.2.1.2	Distribución rectangular .....	47

3.3.2.1.3	Distribución triangular.....	47
3.3.2.1.4	Distribución en forma U .....	48
3.4	Determinación de incertidumbre típica combinada .....	48
3.4.1	Magnitudes de entrada no correlacionadas.....	48
3.5	Determinación de la incertidumbre expandida .....	51
3.6	Elección del factor de cobertura .....	52
3.7	Expresión de la incertidumbre.....	53
3.7.1	Directrices generales.....	53
3.6.2	Directrices específicas .....	55
CAPÍTULO 4	.....	59
4.1	RESULTADOS .....	59
4.2	Procedimiento para el cálculo de la incertidumbre.....	75
4.2.1	Modelo del sistema de medida .....	75
4.3	Fuentes de incertidumbre .....	76
4.4	Cálculo de la incertidumbre estándar de las fuentes .....	76
4.4.1	Corriente .....	78
4.4.2	Tiempo .....	79
4.5	Cálculo de los coeficientes de sensibilidad.....	79
4.6	Cálculo de la incertidumbre estándar combinada.....	80
4.6.1	Corriente .....	80
4.6.2	Tiempo .....	80
4.7	Cálculo de la incertidumbre expandida .....	80
4.8	Expresión del resultado.....	87
4.9	Resultados del Cálculo de Incertidumbre .....	87
4.9.1	Resultados obtenidos .....	93
CAPÍTULO 5	.....	94
5.1	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	94
5.1.1	Conclusiones .....	94
5.1.2	Recomendaciones .....	95
6.	REFERENCIAS .....	96
7.	APÉNDICES Y ANEXOS.....	98

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 <i>Diagrama de Ishikawa de fuentes de incertidumbre</i> .....	40
Figura 2 <i>Informe de R&amp;R para nivel 1: 32 Ah</i> .....	65
Figura 3 <i>Informe de R&amp;R para nivel 2: 79 Ah</i> .....	68
Figura 4 <i>Informe de R&amp;R para nivel 3: 205 Ah</i> .....	72
Figura 5. <i>Gráfica de relación entre In y t - Nivel 1</i> .....	76
Figura 6. <i>Gráfica de relación entre In y t – Nivel 2</i> .....	77
Figura 7. <i>Gráfica de relación entre In y t - Nivel 3</i> .....	78
Figura 8. <i>Gráfico de incertidumbre estándar combinada - Nivel: 32 Ah</i> .....	88
Figura 9. <i>Gráfico de incertidumbre estándar combinada - Nivel: 79 Ah</i> .....	90
Figura 10. <i>Gráfico de incertidumbre estándar combinada - Nivel: 205 Ah</i> .....	92

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Magnitudes y unidades básicas del Sistema SI .....	10
Tabla 2. Magnitudes y unidades derivadas del Sistema SI .....	10
Tabla 3. Valor del factor de cobertura $k_p$ que proporciona un intervalo correspondiente a un nivel de confianza suponiendo una distribución normal .....	27
Tabla 4. Ejemplo de funciones y herramientas .....	28
Tabla 5. Diseño para estudio R&R.....	59
Tabla 6. Niveles de capacidad nominal.....	61
Tabla 7. Datos del nivel 1: 32 Ah.....	62
Tabla 8. Datos del nivel 2: 79 Ah.....	63
Tabla 9. Datos del nivel 3: 205 Ah .....	64
Tabla 10. Tabla ANOVA de dos factores con interacción .....	66
Tabla 11. Tabla ANOVA dos factores sin interacción .....	67
Tabla 12. Componentes de la varianza.....	67
Tabla 13. Evaluación del sistema de medición .....	67
Tabla 14. Tabla ANOVA de dos factores con interacción .....	70
Tabla 15. Tabla ANOVA dos factores sin interacción .....	71
Tabla 16. Componentes de la varianza.....	71
Tabla 17. Evaluación del sistema de medición .....	71
Tabla 18. Tabla ANOVA de dos factores con interacción .....	73
Tabla 19. Tabla ANOVA dos factores sin interacción .....	74
Tabla 20. Componentes de la varianza.....	74
Tabla 21. Evaluación del sistema de medición .....	74
Tabla 22. Fuentes de incertidumbre .....	76
Tabla 26. Cálculo de incertidumbre – Nivel: 32 Ah .....	87
Tabla 27. Cálculo de incertidumbre – Nivel: 79 Ah .....	89
Tabla 28. Cálculo de incertidumbre – Nivel: 205 Ah .....	91
Tabla 29. Incertidumbre del Ensayo de Capacidad de 20 h.....	93

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Los sistemas primitivos de pesos y medidas se basaban en la morfología humana como son: codo, yarda, pie, estas no eran unidades fijas, ya que variaban dependiendo la localización o el objeto que se medía. **(Tomás, 2013)**

El primer codo real fue definido como la longitud del antebrazo del Faraón, teniendo la mano extendida, desde el codo hasta el extremo del dedo medio. La medida original fue transferida en granito negro, se entregaban copias a los trabajadores en los lugares de construcción y era responsabilidad de los arquitectos el mantenimiento del mismo. **(EURAMET eV 2008, 2008)**

La creación del sistema métrico decimal en la época de la Revolución Francesa y el depósito, el 22 de junio de 1799, de dos patrones de platino que representaban el metro y el kilogramo en París, puede considerarse como el primer paso en el desarrollo del actual Sistema Internacional de Unidades. **(Oficina Internacional de Pesas y Medidas, 2013)**

Durante el siglo XIX, la revolución industrial y la creciente globalización del comercio, impulsaron la necesidad de disponer de unidades de medida fiables y de aceptación mundial. Esto condujo en 1875 a un tratado diplomático internacional denominado <<Convención del Metro>> por el que se creó la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM). La BIPM tiene como función la definición de unidades y asegurar en todo el mundo la uniformidad de las mediciones y su trazabilidad. **(Tomás, 2013)**

La economía global actual depende de mediciones y ensayos fiables, los mismos que aporten confianza y sean aceptados internacionalmente. La medición sistemática, con un nivel de incertidumbre conocido, es una de las bases del control de calidad industrial. El coste de las mediciones en las industrias más modernas, supone del 10 % al 15 % de los costes de producción. Bajo esta primicia, las buenas mediciones pueden aumentar significativamente el valor, la vigencia y calidad del producto. **(EURAMET eV 2008, 2008)**

A la hora de expresar un resultado de una medición se debe dar alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado, de esta manera quienes utilizan dicho resultado puedan evaluar su idoneidad. Sin esta indicación, las mediciones no pueden compararse entre sí, ni con valores de referencia dados en normas o especificaciones. Por esto, es necesario tener un procedimiento aceptado universalmente para caracterizar la calidad del resultado de una medición, esto es, para evaluar y expresar su incertidumbre. **(JCGM 100, 2008)**

La Oficina Internacional de Pesas y Medidas, el BIPM por sus siglas en inglés, es la encargada de proporcionar las bases para que un único sistema coherente de medidas se use en todo el mundo, el Sistema Internacional de Medidas, SI. **(Göbel, Mills, & Wallard, 2020)**

La GUM (Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida) llegó a existir porque había diferentes enfoques para el tratamiento de las componentes de la incertidumbre de un experimento a otro, los llamados 'errores sistemáticos'. La situación era tal que en 1980 el BIPM convocó a una reunión con el fin de llegar a un procedimiento uniforme y generalmente aceptable para la especificación de incertidumbre. La GUM estaba destinada a presentar un acuerdo y procedimiento conveniente para un amplio uso. **(Willink, 2016)**

La GUM trata la expresión de la incertidumbre de una magnitud física y también es aplicable a la estimación de la incertidumbre asociada al análisis teórico de experimentos, métodos de medida y sistemas complejos **(JCGM 100, 2008)**, es así

como es utilizada en distintos Laboratorios en un campo amplio de industrias. Esta es una guía, basada en la recomendación del grupo de trabajo del BIPM que proporciona reglas para la expresión de la incertidumbre, útiles en normalización, calibración, servicios de metrología y acreditación de laboratorios.

Los organismos gubernamentales y reguladores con frecuencia tienen que tomar decisiones y para ello deben tener confianza en los resultados generados por laboratorios que realizan ensayos, mediciones o calibraciones. En estos casos, un laboratorio acreditado puede ayudar a establecer y asegurar esta confianza. Cuando un laboratorio está acreditado, éste demuestra competencia técnica para realizar ensayos, mediciones y calibraciones.

La acreditación de laboratorios es otorgada por un organismo de acreditación reconocido dentro del país. Los laboratorios son evaluados de acuerdo a las normas internacionales que son utilizadas en todo el mundo como la ISO/IEC 17025 “Requerimientos generales para la competencia de laboratorios de ensayos y calibraciones” o ISO 15189 “Laboratorios médicos – Requerimientos particulares para calidad y competencia”.

## **1.2. Descripción del problema**

La actividad económica de la compañía se centra en la fabricación e importación de baterías, las cuales posteriormente son comercializadas. Tener abastecido el mercado con las unidades suficientes es uno de los principales objetivos que la alta directiva se plantea; cualquier ruido que afecte a estos procesos provocará un impacto negativo en la cadena de suministro de la empresa. Uno de los requisitos legales que la compañía debe cumplir es el RTE INEN 115 “Baterías de plomo ácido para vehículos automotores”, el cual estipula como requisito para la comercialización de productos nacionales e importados, demostrar su cumplimiento a través de un certificado de conformidad emitido por un laboratorio acreditado o designado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriana (SAE). Actualmente el país carece de

laboratorios acreditados por el SAE que emitan certificados de conformidad, por lo que las organizaciones se ven obligadas a solicitar el servicio a laboratorios internacionales, los cuales tienen un alto costo.

Uno de los objetivos de la organización es lograr la acreditación del laboratorio de control de calidad, con la finalidad de reducir el tiempo en los procesos de importación y a la vez menguar los altos costos de los certificados de conformidad que emiten los laboratorios acreditados.

La acreditación otorgada por el SAE es bajo la norma ISO/IEC 17025, "Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración", en donde el requisito 5.4.6, titulado "Estimación de la incertidumbre de la medición", establece que se requiere la determinación de la incertidumbre de la medición, a diferencia del método de ensayo la incertidumbre es propia del laboratorio y debe ser calculada por cada ensayo que se realice.

El propósito de este trabajo es presentar la estimación de la incertidumbre de los ensayos eléctricos para el cumplimiento de uno de los requisitos de la norma y poder así contribuir en el proceso de acreditación del Laboratorio.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivos Generales**

Desarrollar una metodología para determinar la incertidumbre del ensayo de Capacidad de 20 h aplicado en baterías de plomo-ácido de 12 V con la finalidad de cumplir con uno de los requisitos de la norma ISO/IEC 17025:2017.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Ensayar baterías de acuerdo a la norma IEC 60095-1:2018 en un Laboratorio de Control de Calidad
- Realizar la validación del método Capacidad de 20 h como requisito de la norma ISO/IEC 17025:2017
- Identificar las fuentes de incertidumbre asociadas al ensayo de Capacidad de 20 h
- Evaluar el modelo matemático para expresar la incertidumbre del ensayo

### **1.4. Justificación**

La organización se ha planteado como objetivo la acreditación del laboratorio con la finalidad de reducir el tiempo en los procesos de importación y a la vez menguar los altos costos de los certificados de conformidad que se emiten en países que cuentan con laboratorios acreditados.

La incertidumbre de medida, es un parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de los datos utilizados; esta incertidumbre, constituye un elemento indispensable de la trazabilidad de las mediciones, que permite realizar la evaluación de conformidad con especificaciones mediante resultados de diferentes mediciones. La Norma NTE INEN-ISO/IEC 17025:2018, establece en el numeral 7.2.1.1 que “El laboratorio debe usar métodos y procedimientos apropiados para todas las actividades de laboratorio y, cuando sea apropiado, para la evaluación de la incertidumbre de medición, así como también las técnicas estadísticas para el análisis de datos.”.

La acreditación es otorgada por el SAE, bajo la norma ISO/IEC 17025, “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración”, en donde el requisito 5.4.6, titulado “Estimación de la

incertidumbre de la medición”, establece que se requiere la determinación de la incertidumbre de la medición, a diferencia del método de ensayo la incertidumbre es propia del laboratorio y debe ser calculada por cada ensayo que se realice. Además, se menciona en la Política para la estimación de la incertidumbre de la medición, que los laboratorios de calibración y ensayo, acreditados por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano y laboratorios que se encuentren en proceso de acreditación, deben estimar la incertidumbre de medición en cumplimiento con la "Guía para la expresión de la incertidumbre de medida" (GUM) o métodos alternativos aceptados por el BIPM. **(Servicio de Acreditación Ecuatoriano, 2019)**

Y como ya se ha mencionado previamente, en nuestro país no existe un laboratorio acreditado para realizar ensayos eléctricos a baterías, por lo que este tema es de gran interés para la organización. Adicional a esto, a título personal, este estudio constituye un gran reto al contribuir con la empresa para obtener la acreditación del laboratorio y, de esta manera, brindar confiabilidad en los resultados tanto al cliente interno como al externo.

### **1.5. Hipótesis**

Con el método propuesto para la determinación de la incertidumbre del ensayo de Capacidad de 20 h aplicado a baterías de arranque de 12 V en el laboratorio de Control de Calidad, se confirmará la validez de las mediciones obtenidas y garantizará la confiabilidad de los resultados obtenidos.

### **1.6. Alcance**

Para el presente proyecto se hará uso de resultados de ensayos eléctricos de “Capacidad de 20 h del año 2019, los cuales se ejecutaron en un Laboratorio de Control de Calidad, perteneciente a una empresa ubicada en la ciudad de Guayaquil, que se dedica a la fabricación de baterías de plomo-ácido de 12 V”.

# CAPÍTULO 2

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Estado del Arte

Al expresar un resultado de medición es necesario dar una indicación cuantitativa de la calidad de este resultado para evaluar su idoneidad. Sin esta indicación las mediciones no se pueden comparar entre sí, ni con otros valores de referencia dados en especificaciones o normas. Para caracterizar la calidad del resultado de una medición es importante establecer un procedimiento para evaluar y expresar su incertidumbre. **(JCGM 100, 2008)**

Muchas de las decisiones importantes se basan en la medición; estos resultados pueden ser utilizados como por ejemplo para evaluar la conformidad de un producto, para comprobar un material en relación con su especificación o límites legales, etc. **(Désefnant & Priel, 2016)**

La evaluación de la incertidumbre es a menudo considerada como una tarea difícil y ardua. La Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM), establece los conceptos acordados internacionalmente, recomendaciones, y el procedimiento para la evaluación de la incertidumbre; es por esto que la GUM es considerada como el documento maestro para la evaluación de la incertidumbre. **(Désefnant & Priel, 2016)**, así por ejemplo los autores **(Désefnant & Priel, 2016)**, en su estudio introducen métodos adicionales a la GUM, métodos basados en la repetibilidad o reproducibilidad y aproximaciones de veracidad; los mismos son utilizados para resolver el caso donde no se pudo establecer un modelo de medición ya sea debido a dificultades técnicas o a limitaciones de costo. En esta situación se utiliza un modelo estadístico global, el cual representa una

simplificación del modelo de medición en donde algunas magnitudes de entrada se fusionan.

La aplicación no es una sola, así vemos en el trabajo efectuado por **(Theodorou, y otros, 2010)** que para estimar la incertidumbre de la determinación directa de cadmio en agua por espectrometría de absorción atómica en horno de grafito utiliza dos enfoques: la incertidumbre expandida con nivel de confianza del 95% obtenido por el marco de la GUM y el método Monte Carlo; en el nivel de concentración de 3.01 g/L fueron  $\pm 0.20$  g/L y  $\pm 0.18$  g/L, respectivamente. Es decir, GUM sobreestima la incertidumbre general en un 10%. El método Monte Carlo da nuevamente el mismo resultado de incertidumbre ( $\pm 0.18$  g/L), incluso después de considerar fuentes adicionales de incertidumbre que el Marco de Incertidumbre GUM considera como insignificante. La fuente principal de esta diferencia es la aproximación utilizada por el marco de incertidumbre GUM al estimar la incertidumbre estándar de la curva de calibración producida por la regresión de mínimos cuadrados. GUM demuestra ser adecuado en este caso particular, generalmente el Método Monte Carlo tiene características que evitan los supuestos y las limitaciones que la GUM considera.

Actualmente son escasos los estudios realizados sobre la determinación de la incertidumbre en ensayos eléctricos aplicados a baterías de plomo ácido, por lo que el presente trabajo pretende ser una referencia para futuras investigaciones.

## **2.2. Marco teórico**

En el siguiente apartado se muestran las definiciones de los conceptos más subyacentes dentro de lo que es el campo de la estimación de la incertidumbre:

### **2.2.1. Fundamentos metrológicos**

Para entrar en contexto es importante conocer los siguientes puntos:

- La Oficina Internacional de Pesas y Medidas, el BIPM por sus siglas en inglés, es la encargada de proporcionar las bases para que un único sistema coherente de medidas se use en todo el mundo, el Sistema Internacional de Medidas, SI. **(Göbel, Mills, & Wallard, 2020)**
- Desde la época de la Revolución Francesa, el sistema métrico decimal se basaba en el metro y el kilogramo, sin embargo; este sistema ha ido desarrollándose a lo largo del tiempo, de tal forma que ahora incluye siete unidades básicas. **(Göbel, Mills, & Wallard, 2020)**
- El SI no es estático, según avanza la ciencia y se mejoran los métodos de medida, se tienen que revisar sus definiciones.

#### **2.2.1.1. Sistema internacional de unidades SI**

Sistema de unidades adoptado por la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), el cual se basa en el Sistema Internacional de Magnitudes, con nombres y símbolos de las unidades y con una serie de prefijos con sus nombres y símbolos, incluye reglas para su utilización. **(JCGM 200, 2012)**

##### **2.2.1.1.1. Unidades básicas**

Las magnitudes y unidades básicas se presentan, con sus símbolos (Göbel, Mills, & Wallard, 2020), en la siguiente tabla:

**Tabla 1. Magnitudes y unidades básicas del Sistema SI**

Magnitud Básica	Unidad	Símbolo
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Corriente eléctrica	amperio	A
Temperatura termodinámica	kelvin	K
Cantidad de sustancia	mol	Mol
Intensidad luminosa	candela	cd

**2.2.1.1.2. Unidades derivadas**

El resto de magnitudes se denominan magnitudes derivadas y se expresan mediante unidades derivadas, definidas como productos de potencias de las unidades básicas (**Göbel, Mills, & Wallard, 2020**), en la siguiente tabla se incluyen ejemplos de magnitudes y unidades derivadas:

**Tabla 2. Magnitudes y unidades derivadas del Sistema SI**

Magnitud Derivada	Símbolo	Unidad Derivada	Símbolo
Área	$A$	metro cuadrado	$m^2$
Volumen	$V$	metro cúbico	$m^3$
Velocidad	$v$	metro por segundo	m/s
Aceleración	$a$	metro por segundo cuadrado	$m/s^2$
número de ondas	$\sigma, \tilde{\nu}$	metro a la potencia menos uno	$m^{-1}$
densidad de masa	$\rho$	kilogramo por metro cúbico	$kg/m^3$
densidad superficial	$\rho_A$	kilogramo por metro cuadrado	$kg/m^2$
volumen específico	$v$	metro cúbico por kilogramo	$m^3/kg$
densidad de corriente	$j$	amperio por metro cuadrado	$A/m^2$

intensidad de campo magnético	$H$	amperio por metro	A/m
Concentración	$c$	mol por metro cúbico	mol/m <sup>3</sup>
concentración de masa	$\rho, \gamma$	kilogramo por metro cúbico	kg/m <sup>3</sup>
Luminancia	$L_v$	candela por metro cuadrado	cd/m <sup>2</sup>
índice de refracción	$n$	uno	1
permeabilidad relativa	$\mu_r$	uno	1

### 2.2.1.2. Historia de la metrología

Los sistemas primitivos de pesos y medidas se basaban en la morfología humana (unidades antropomórficas): codo, yarda (o cúbito), pie, etc. Por lo tanto, no eran unidades «fijas», variaban según la localización, la ocupación o el objeto que se medía. **(Gella Tomás, 2013)**

El inicio de la metrología moderna seguramente puede situarse en 1795, cuando la Asamblea Nacional Francesa adopta el Sistema Métrico Decimal basado en 2 unidades fundamentales: el metro y el kilogramo. **(Gella Tomás, 2013)**

La revolución francesa de 1789, con su ideología oficial de la razón pura, fomentó el concepto de que las unidades de medida debían estar basadas en constantes de la naturaleza (inicialmente, invariable en el tiempo). Así, el metro fue definido como la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre. Para esto, se midió la longitud del meridiano que va desde la Torre del Fuerte en Montjuic (Barcelona) a Dunkerque. Durante los siguientes decenios numerosos países adoptaron de forma oficial el Sistema Métrico Decimal. **(Gella Tomás, 2013)**

La revolución industrial y la creciente globalización del comercio durante el siglo XIX promovieron la necesidad de disponer de unidades de medidas fiables y de aceptación mundial. Este hecho condujo a un tratado diplomático internacional en 1875 denominado «Convención del Metro» por el que se creó la Oficina

Internacional de Pesos y Medidas (BIPM), este tratado fue firmado por 17 estados, aunque posteriormente se sumaron otros, hasta los 51 Estados miembros actuales. La BIPM tiene como funciones la definición de las unidades y asegurar en todo el mundo la uniformidad de las mediciones y su trazabilidad. **(Gella Tomás, 2013)**

En 1960, durante la onceava Conferencia General de Pesos y Medidas, se estableció el Sistema Internacional de Unidades (SI), heredero del Sistema Métrico Decimal y basado en 6 unidades fundamentales: el metro, el kilogramo, el segundo, el kelvin, la candela y el amperio, a las que posteriormente en el año de 1971 se agregó el mol. **(Gella Tomás, 2013)**

Las unidades del SI constituyen una referencia internacional de las indicaciones de los instrumentos de medición, por lo que esto permite lograr una equivalencia de las medidas realizadas en lugares distantes o en distintos momentos y mantener uniformidad en las medidas. **(Gella Tomás, 2013)**

Entre los años 2006 y 2009 el SI se unificó con la norma ISO 31: Quantities and Units (actualmente revisada en la norma ISO/IEC 80000) para establecer el Sistema Internacional de Magnitudes con las siglas ISQ. Aparte de la creación de la BIPM y del desarrollo del SI, la llegada durante el siglo XX de los organismos de normalización contribuyó en el establecimiento de la metrología moderna. **(Gella Tomás, 2013)**

Los Estados Unidos de América fueron pioneros en este ámbito al crear la Oficina Nacional de Normalización (National Bureau of Standards [NBS]) en 1901, sustituyendo a su Oficina de Pesos y Medidas. En 1988 se cambió el nombre a Instituto Nacional de Normalización y Tecnología (National Institute of Standards and Technology [NIST]). La misión de esta organización es la de promover la innovación y la competitividad industrial mediante avances en la ciencia de las medidas, la normalización y la tecnología con la finalidad de mejorar la seguridad económica y la calidad de vida. **(Gella Tomás, 2013)**

En 1947 delegados de 25 países crearon la Organización Internacional de Normalización (ISO) con la finalidad de facilitar la coordinación internacional y unificar las normas industriales. **(Gella Tomás, 2013)**

En 1975 se inician oficialmente las actividades del Comité Europeo de Normalización (CEN), única organización europea con la capacidad de establecer normas para la Unión Europea. A nivel nacional, en 1986 se crea la Asociación Española de Normalización (AENOR), miembro oficial del CEN y de la ISO, y en 1989 el Centro Español de Metrología (CEM). **(Gella Tomás, 2013)**

Ecuador cuenta con el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), el mismo fue creado el 28 de agosto de 1970, mediante Decreto Supremo No. 357 publicado en el Registro Oficial No. 54 del 7 de septiembre de 1970 y desde su inicio ha venido actuando como la entidad nacional encargada de formular las Normas Técnicas Ecuatorianas teniendo como concepto básico satisfacer las necesidades locales y facilitar el comercio nacional e internacional. **(INEN, 2020)**

La misión del INEN es fortalecer el Sistema Ecuatoriano de la Calidad, contribuyendo a la competitividad, confianza y satisfacción de las partes interesadas, mediante la mejora continua de los procesos de normalización, reglamentación técnica, evaluación de la conformidad y metrología. **(INEN, 2020)**

### **2.2.1.3. Metrología**

La metrología de acuerdo a la definición del vocabulario internacional de metrología, es la ciencia de las mediciones y sus aplicaciones, e incluye una nota la cual menciona que la metrología incluye todos los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones, cualesquiera que sean su incertidumbre de medida y su campo de aplicación. **(JCGM 200, 2012)**

La Metrología suele considerarse dividida en tres categorías, cada una de ellas con diferentes niveles de complejidad y exactitud:

#### **2.2.1.3.1. Metrología científica**

La Metrología Científica se ocupa de la organización y el desarrollo de los patrones de medida y de su mantenimiento en el nivel más alto.

La Metrología Científica está dividida en 9 campos técnicos por el BIPM: acústica, cantidad de sustancia, electricidad y magnetismo, fotometría y radiometría, longitud, masa, radiaciones ionizantes y radioactividad, termometría y tiempo y frecuencia. **(EURAMET eV 2008, 2008)**

#### **2.2.1.3.2. Metrología industrial**

La Metrología Industrial debe asegurar el adecuado funcionamiento de los instrumentos de medida empleados en la industria, en los procesos de producción y verificación para asegurar la calidad.

Las actividades metrológicas de calibración, medición y ensayo son fundamentales para garantizar la calidad de actividades y procesos industriales, así como también de la calidad de vida. Ello supone la necesidad de contar con trazabilidad, lo que llega a ser tan importante como la propia medición. **(EURAMET eV 2008, 2008)**

#### **2.2.1.3.3. Metrología legal**

La Metrología legal es la tercera categoría de la metrología, la misma tiene su origen en la necesidad de garantizar el comercio leal, especialmente en el área de las pesas y las medidas. Esta se ocupa principalmente de los instrumentos de medida que están controlados legalmente, y su principal objetivo es garantizar a los ciudadanos que los resultados de medida sean correctos, cuando éstos se utilizan en las transacciones oficiales y comerciales en cada país. **(EURAMET eV 2008, 2008)**

#### **2.2.1.4. Vocabulario internacional de términos (VIM)**

De forma general, un vocabulario es un “diccionario terminológico que contiene las denominaciones y definiciones que conciernen a uno o varios campos específicos” (ISO 1087-1:2000, 3.7.2). El VIM se refiere a la metrología, “la ciencia de las mediciones y sus aplicaciones”, abarca también los principios relativos a las magnitudes y unidades. **(JCGM 200, 2012)**

El VIM proporciona un conjunto de definiciones y de términos asociados, en idioma español, para un sistema de conceptos fundamentales y generales utilizados en metrología, así como diagramas conceptuales que representan sus relaciones. En muchas de las definiciones se da información complementaria por medio de ejemplos y notas. **(JCGM 200, 2012)**

El VIM procura ser una referencia común para científicos, ingenieros, físicos, químicos, médicos, biólogos, así como para profesores, estudiantes y todo aquel, implicado en la planificación o realización de mediciones, cualquiera que sea el campo de aplicación y el nivel de incertidumbre de la medida, también procura ser una referencia para organismos gubernamentales e intergubernamentales, asociaciones empresariales, comités de acreditación, entidades reguladoras y asociaciones profesionales. **(JCGM 200, 2012)**

El VIM intenta promover la armonización global de la terminología utilizada en metrología. **(JCGM 200, 2012)**

#### **2.2.1.5. Mensurando**

El mensurando de acuerdo a la definición del vocabulario internacional de metrología es la magnitud que se desea medir. La especificación de un mensurando requiere el conocimiento de la naturaleza de la magnitud y la descripción del estado del fenómeno, cuerpo o sustancia cuya magnitud es una propiedad, incluyendo las componentes pertinentes y las entidades químicas involucradas. **(JCGM 200, 2012)**

La medición, incluyendo el sistema de medida y las condiciones bajo las cuales se realiza ésta, podría alterar el fenómeno, cuerpo o sustancia, de tal manera que la magnitud bajo medición difiriera del mensurando, para esto sería necesario efectuar la corrección apropiada. **(JCGM 200, 2012)**

EJEMPLO 1 La diferencia de potencial entre los terminales de una batería puede disminuir cuando se utiliza un voltímetro con una conductancia interna significativa. La diferencia de potencial en circuito abierto puede calcularse a partir de las resistencias internas de la batería y del voltímetro.

EJEMPLO 2 La longitud de una varilla cilíndrica de acero en equilibrio térmico a una temperatura ambiente de 23 °C será diferente de su longitud a la temperatura de 20 °C, para la cual se define el mensurando, por ello es necesaria una corrección. **(JCGM 200, 2012)**

#### **2.2.1.6. Medición**

La medición de acuerdo a la definición del vocabulario internacional de metrología es el proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud. **(JCGM 200, 2012)**

#### **2.2.1.7. Incertidumbre**

El VIM define la incertidumbre como parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza. **(JCGM 200, 2012)**

La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones, así como la incertidumbre debida a la definición. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre. **(JCGM 200, 2012)**

De forma general, para una información dada, se sobrentiende que la incertidumbre de medida está asociada a un valor determinado atribuido al mensurando. Por tanto, una modificación de este valor supone una modificación de la incertidumbre asociada. **(JCGM 200, 2012)**

#### **2.2.1.7.1. Incertidumbre típica combinada**

Incertidumbre típica del resultado de una medición, cuando el resultado se obtiene a partir de los valores de otras magnitudes, igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, siendo éstos las varianzas o covarianzas de esas otras magnitudes, ponderadas en función de la variación del resultado de medida con la variación de dichas magnitudes. **(JCGM 100, 2008)**

#### **2.2.1.7.2. Incertidumbre expandida**

Magnitud que define un intervalo en torno al resultado de una medición, y en el que se espera encontrar una fracción importante de la distribución de valores que podrían ser atribuidos razonablemente al mensurando. La fracción puede entenderse como la probabilidad o el nivel de confianza del intervalo. **(JCGM 100, 2008)**

Para asociar un nivel específico de confianza a un intervalo definido por la incertidumbre expandida, se requieren hipótesis explícitas o implícitas sobre la distribución de probabilidad representada por el resultado de medida y su incertidumbre típica combinada. El nivel de confianza que puede atribuirse a este intervalo posee la misma validez que las hipótesis realizadas. **(JCGM 100, 2008)**

La incertidumbre expandida se denomina incertidumbre global en el apartado 5 de la Recomendación INC-1 (1980). **(JCGM 100, 2008)**

### **2.2.1.7.3. Factor de cobertura**

Factor numérico utilizado como multiplicador de la incertidumbre típica combinada, para obtener la incertidumbre expandida. Habitualmente se utiliza el símbolo  $k$  para el factor de cobertura. Un factor de cobertura  $k$  típico, toma valores comprendidos entre 2 y 3. **(JCGM 100, 2008)**

### **2.2.1.8. Evaluación de la incertidumbre estándar**

La Recomendación INC-1 (1980) del Grupo de Trabajo sobre la Expresión de las Incertidumbres agrupa a las componentes de la incertidumbre en dos categorías, según su método de evaluación, “A” y “B”. La incertidumbre de una corrección por efecto sistemático conocido puede obtenerse en algunos casos mediante una evaluación Tipo A, mientras que en otros casos puede obtenerse mediante una evaluación Tipo B; lo mismo puede decirse para una incertidumbre que caracteriza a un efecto aleatorio.

El propósito de la clasificación en Tipo A y Tipo B es indicar las dos formas diferentes de evaluar las componentes de incertidumbre, a efectos únicamente de su análisis; esta clasificación no trata de indicar que exista alguna diferencia de naturaleza entre las componentes resultantes de ambos tipos de evaluación. Los dos tipos de evaluación se basan en distribuciones de probabilidad y las componentes resultantes tanto de uno como del otro tipo de evaluación se cuantifican mediante varianzas o desviaciones típicas. **(JCGM 100, 2008)**

#### **2.2.1.8.1. Evaluación Tipo A**

Método de evaluación de la incertidumbre mediante análisis estadístico de series de observaciones. **(JCGM 100, 2008)**

#### **2.2.1.8.2. Evaluación Tipo B**

Método de evaluación de la incertidumbre por medios distintos al análisis estadístico de series de observaciones. **(JCGM 100, 2008)**

#### **2.2.1.9. Incertidumbre típica combinada**

Incertidumbre típica del resultado de una medición, cuando el resultado se obtiene a partir de los valores de otras magnitudes, igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, siendo éstos las varianzas o covarianzas de esas otras magnitudes, ponderadas en función de la variación del resultado de medida con la variación de dichas magnitudes. **(JCGM 100, 2008)**

##### **2.2.1.9.1. Ley de la propagación de las incertidumbres**

Si se hacen variar todas las magnitudes de las que depende el resultado de una medición, su incertidumbre puede evaluarse por métodos estadísticos. Sin embargo, en la práctica, esto no es posible, por limitaciones de tiempo y de recursos; por ello, la incertidumbre de un resultado de medida habitualmente se evalúa acudiendo a un modelo matemático de la medición, y a la **ley de propagación de la incertidumbre**. **(JCGM 100, 2008)**

##### **2.2.1.9.1.1. Justificación para tratar de forma idéntica todas las componentes de la incertidumbre**

A continuación, se ilustra mediante un ejemplo sencillo cómo la Guía GUM trata exactamente de la misma forma las componentes de la incertidumbre provenientes de efectos aleatorios, y las provenientes de correcciones estimadas de efectos sistemáticos, a la hora de evaluar la incertidumbre de un resultado de medida. De esta forma se ejemplifica el punto de vista adoptado en la Guía, el mismo que menciona:

“Este método presentado para evaluar y expresar la incertidumbre proporciona un valor de la incertidumbre realista, más que “seguro”, basado en la idea de que no existe diferencia de naturaleza entre una componente de incertidumbre proveniente de un efecto aleatorio y otra que proviene de una corrección por efecto sistemático”; es decir, que todas las componentes de la incertidumbre son de la misma naturaleza y deben ser tratadas de forma idéntica. El punto de partida de la presentación es una demostración simplificada de la expresión matemática de la propagación de desviaciones típicas, denominada en esta Guía ley de propagación de la incertidumbre. **(JCGM 100, 2008)**

Supongamos que la magnitud de salida  $z = f(w_1, w_2, \dots, w_N)$  depende de N magnitudes de entrada  $w_1, w_2, \dots, w_N$ , donde cada  $w_i$ , viene descrita por una distribución de probabilidad adecuada. El desarrollo en serie de Taylor de primer orden, de f alrededor de las esperanzas matemáticas de las  $w_i$ ,  $E(w_i) \equiv \mu_i$ , es, para las pequeñas variaciones de z alrededor de  $\mu_z$  en función de las pequeñas variaciones de  $w_i$  alrededor de  $\mu_i$ ,

$$z - \mu_z = \sum_{i=1}^N \frac{\partial f}{\partial w_i} (w_i - \mu_i) \quad (1)$$

donde los términos de grado más elevado se suponen despreciables, y con  $\mu_z = f(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$ . El cuadrado de la diferencia  $z - \mu_z$  viene dado entonces por:

$$(z - \mu_z)^2 = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{\partial f}{\partial w_i} (w_i - \mu_i) \right]^2 \quad (2)$$

que puede escribirse en la forma

$$(z - \mu_z)^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial w_i} \right)^2 (w_i - \mu_i)^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial w_i} \frac{\partial f}{\partial w_j} (w_i - \mu_i) (w_j - \mu_j) \quad (3)$$

La esperanza matemática del cuadrado de la diferencia  $(z - \mu_z)^2$  es la varianza de  $z$ ; es decir,  $E[(z - \mu_z)^2] = \sigma_z^2$ , y la ecuación (3) conduce a:

$$\sigma_z^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial w_i} \right)^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial w_i} \frac{\partial f}{\partial w_j} \sigma_i \sigma_j \sigma_{ij} \quad (4)$$

En esta expresión  $\sigma_i^2 = E[(w_i - \mu_i)^2]$  es la varianza de  $w_i$  y  $\rho_{ij} = v(w_i, w_j) / (\sigma_i^2 \sigma_j^2)^{1/2}$  es el coeficiente de correlación de  $w_i$  y  $w_j$ , donde  $v(w_i, w_j) = E[(w_i - \mu_i)(w_j - \mu_j)]$  es la covarianza de  $w_i$  y  $w_j$ . (JCGM 100, 2008)

NOTA 1  $\sigma_z^2$  y  $\sigma_i^2$  son respectivamente los momentos centrales de orden 2 de las distribuciones de probabilidad de  $z$  y de  $w_i$ . Una distribución de probabilidad puede caracterizarse completamente mediante su esperanza matemática, su varianza y sus momentos centrales de mayor orden. Para ello es importante mencionar los conceptos siguientes:

### **Momento central<sup>2</sup> de orden $q$**

en una distribución de una única variable, es la esperanza matemática de la  $q$ -ésima potencia de la variable aleatoria centrada  $(X - \mu)$ :

$$E[(X - \mu)^q] \quad (5)$$

El momento central de orden 2 es la varianza de la variable aleatoria  $X$ .

**Varianza** (de una variable aleatoria o de una distribución de probabilidad) esperanza matemática del cuadrado de la variable aleatoria centrada

$$\sigma^2 = V(X) = E\{[X - E(X)]^2\} \quad (6)$$

### Variable aleatoria centrada

variable aleatoria cuya esperanza matemática es igual a cero. Si la variable aleatoria  $X$  tiene por esperanza matemática  $\mu$ , la correspondiente variable aleatoria centrada es  $(X - \mu)$ .

En la terminología tradicional, la siguiente ecuación:

$$\sigma_z^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial w_i} \right)^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial w_i} \frac{\partial f}{\partial w_j} \sigma_i \sigma_j \sigma_{ij} \quad (7)$$

se denomina generalmente “ley general de propagación de errores”, denominación que se aplica mejor a una expresión de la forma  $\Delta z = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial w_i} \right) \Delta w_i$ , donde  $\Delta z$  es la variación de  $z$  debida a (pequeñas) variaciones  $\Delta w_i$  de  $w_i$ . Es apropiado denominar a la ecuación (7) como la ley de propagación de la incertidumbre, puesto que esta ecuación muestra cómo se componen las incertidumbres de magnitudes de entrada  $w_i$ , dadas por las desviaciones típicas de las distribuciones de probabilidad de las  $w_i$ , para obtener la incertidumbre de la magnitud de salida  $z$ , si esta incertidumbre es también igual a la desviación típica de la distribución de probabilidad de  $z$ . **(JCGM 100, 2008)**

Esta ecuación se aplica también a la propagación de múltiples desviaciones típicas puesto que si se reemplaza cada desviación típica  $\sigma_i$  por un múltiplo  $k\sigma_i$ , con el mismo  $k$  para cada  $\sigma_i$ , la desviación típica de la magnitud de salida  $z$  viene dada por  $k\sigma_z$ . Sin embargo, dicha ecuación no es de aplicación a la propagación de los intervalos de confianza. En efecto, si cada  $\sigma_i$  se reemplaza por una magnitud  $\delta_i$  que define un intervalo correspondiente a un nivel de confianza dado  $p$ , la magnitud resultante para  $z$ ,  $\delta_z$ , no definirá un intervalo correspondiente al mismo valor de  $p$ , salvo que todas las  $w_i$  sigan distribuciones normales. La ecuación no presupone ninguna hipótesis sobre la normalidad de las distribuciones de probabilidad de las magnitudes  $w_i$ . **(JCGM 100, 2008)**

Si en la ecuación:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (8)$$

Cada incertidumbre típica  $u(x_i)$  es evaluada a partir de observaciones repetidas independientes, y se multiplica por el factor  $t$  correspondiente a su número de grados de libertad para un valor particular de  $p$  (por ejemplo,  $p = 95 \%$ ), la incertidumbre de la estimación y no definirá un intervalo correspondiente a dicho valor de  $p$ . **(JCGM 100, 2008)**

La exigencia de normalidad para la propagación de los intervalos de confianza utilizando la ecuación de la ley de propagación de la incertidumbre puede ser una de las razones para la separación histórica entre componentes de incertidumbre deducidas de observaciones repetidas, que se suponen distribuidas normalmente, y componentes evaluadas simplemente mediante límites superior e inferior. **(JCGM 100, 2008)**

#### **2.2.1.10. Incertidumbre expandida**

Es el producto de una **incertidumbre típica combinada** y un factor mayor que uno. El factor depende del tipo de distribución de probabilidad de la magnitud de salida en un modelo de medición y de la probabilidad de cobertura elegida. El factor que interviene en esta definición es el factor de cobertura. **(JCGM 100, 2008)**

La incertidumbre expandida se denomina “incertidumbre global” en el párrafo 5 de la Recomendación INC-1 (1980) y simplemente “incertidumbre” en los documentos IEC. **(JCGM 100, 2008)**

##### **2.2.1.10.1. Elección del factor de cobertura**

El valor del factor de cobertura  $k$  se elige en función del nivel de confianza requerido para el intervalo  $y - U$  a  $y + U$ . En general,  $k$  toma un valor entre 2 y 3.

Sin embargo, en aplicaciones especiales,  $k$  puede tomarse fuera de dicho margen de valores. La experiencia y el conocimiento amplio sobre la utilización de los resultados de medida pueden facilitar la elección de un valor conveniente para  $k$ . **(JCGM 100, 2008)**

Idealmente, debería poderse escoger un valor específico del factor de cobertura  $k$  que proporcione un intervalo  $Y = y \pm U = y \pm k uc(y)$  correspondiente a un nivel de confianza particular  $p$ , por ejemplo, un 95 o un 99 por ciento  $y$ , de forma equivalente, para un valor dado de  $k$ , debería ser posible enunciar de forma inequívoca el nivel de confianza asociado a dicho intervalo. Sin embargo, no es fácil lograr esto en la práctica puesto que se requiere un conocimiento amplio de la distribución de probabilidad caracterizada por el resultado de medida  $y$ , y su incertidumbre típica combinada  $uc(y)$ . Aunque estos parámetros son de importancia crítica, sin embargo no son suficientes por sí mismos para poder establecer intervalos con niveles de confianza exactamente conocidos. **(JCGM 100, 2008)**

La Recomendación INC-1 (1980) no especifica cómo debe establecerse la relación entre  $k$  y  $p$ . No obstante, una propuesta más sencilla, es a menudo adecuada para series de mediciones donde la distribución de la probabilidad representada por  $y$  y  $uc(y)$  es aproximadamente normal, y el número de grados efectivos de libertad de  $uc(y)$  es significativo. Cuando este es el caso, frecuente en la práctica, se puede suponer que  $k = 2$  representa un intervalo con un nivel de confianza de aproximadamente el 95 por ciento, y que  $k = 3$  representa un intervalo con un nivel de confianza de aproximadamente el 99 por ciento. **(JCGM 100, 2008)**

#### **2.2.1.10.2. Evaluación de la incertidumbre expandida**

La nueva expresión de la incertidumbre, que satisface la exigencia de proporcionar un intervalo, se denomina incertidumbre expandida, y se representa

por  $U$ . La incertidumbre expandida  $U$  se obtiene multiplicando la incertidumbre típica combinada  $uc(y)$  por un factor de cobertura  $k$ :

$$U = k uc(y) \quad (9)$$

Resulta conveniente expresar el resultado de una medición en la forma  $Y = y \pm U$ , lo que se interpreta como: la mejor estimación del valor atribuible al mensurando  $Y$  es  $y$ , y que puede esperarse que en el intervalo que va de  $y - U$  a  $y + U$  esté comprendida una fracción importante de la distribución de valores que podrían ser razonablemente atribuidos a  $Y$ . Tal intervalo puede también expresarse por  $y - U \leq Y \leq y + U$ . **(JCGM 100, 2008)**

### 2.2.1.10.3. Teorema del límite central

Si  $Y = c_1X_1 + c_2X_2 + \dots + c_NX_N = \sum_{i=1}^N c_iX_i$ , y todas las  $X_i$  vienen caracterizadas por distribuciones normales, la distribución de  $Y$ , resultante de la convolución, también es normal. No obstante, aunque las distribuciones de  $X_i$  no sean normales, es posible suponer una distribución normal para  $Y$ , teniendo en cuenta el Teorema del Límite Central. Este teorema establece que la distribución de  $Y$  será *aproximadamente normal*, con esperanza matemática  $E(Y) = \sum_{i=1}^N c_iE(X_i)$  y varianza  $\sigma^2(Y) = \sum_{i=1}^N c_i^2\sigma^2(X_i)$ , donde  $E(X_i)$  es la esperanza matemática de  $X_i$  y  $\sigma^2X_i$  es la varianza de  $X_i$ , siempre que las  $X_i$  sean independientes y  $\sigma^2(Y)$  sea mucho mayor que cualquier otra componente  $c_i^2\sigma^2(X_i)$  de una  $X_i$  cuya distribución no sea normal. **(JCGM 100, 2008)**

El Teorema del Límite Central es relevante ya que muestra el importante papel que representan las varianzas de las distribuciones de probabilidad de las magnitudes de entrada, en relación con el representado por los momentos de mayor orden de dichas distribuciones, en la determinación de la forma de la distribución de  $Y$ , resultante de la convolución. Implica además que la distribución obtenida tras la convolución converge hacia una distribución normal a medida que aumenta el número de magnitudes de entrada que contribuyen a  $\sigma^2(Y)$ , que la

convergencia será tanto más rápida cuanto más próximos sean entre sí los valores de  $c_i^2 \sigma^2(X_i)$  (lo que equivale en la práctica a que las estimaciones de entrada  $X_i$  contribuyen con incertidumbres comparables a la incertidumbre de la estimación y del mensurando  $Y$ ), y que cuanto más próximas a la normal sean las distribuciones de  $X_i$ , menor número de ellas será necesario para obtener una distribución normal para  $Y$ . **(JCGM 100, 2008)**

Para todo intervalo con nivel de confianza  $p$  superior a aproximadamente un 91,7 %, el valor de  $k_p$  para una distribución normal es siempre superior al valor correspondiente de la distribución resultante de la convolución de distribuciones rectangulares, cualquiera que sea el número y amplitud de éstas. **(JCGM 100, 2008)**

Del Teorema del Límite Central se deduce que la distribución de probabilidad de la media aritmética  $\bar{q}$  de  $n$  observaciones  $q_k$  de una variable aleatoria  $q$  con esperanza matemática  $\mu_q$  y desviación típica finita  $\sigma$ , se aproxima a una distribución normal de media  $\mu_q$  y desviación típica  $\sigma / \sqrt{n}$ , cuando  $n \rightarrow \infty$ , cualquiera que sea la distribución de probabilidad de  $q$ . **(JCGM 100, 2008)**

Una consecuencia práctica del Teorema del Límite Central es que siempre que pueda demostrarse que se cumplen aproximadamente las hipótesis para su validez, en particular que la incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$  no esté dominada por una componente de incertidumbre típica obtenida por una evaluación Tipo A basada en unas pocas observaciones, o por una componente de incertidumbre típica obtenida por evaluación Tipo B basada en una distribución rectangular, una primera aproximación razonable para el cálculo de una incertidumbre expandida  $U_p = k_p u_c(y)$  que proporcione un intervalo con nivel de confianza  $p$ , es utilizar para  $k_p$  un valor tomado de la distribución normal. La tabla 3 presenta los valores más comúnmente utilizados para este fin. **(JCGM 100, 2008)**

**Tabla 3. Valor del factor de cobertura  $k_p$  que proporciona un intervalo correspondiente a un nivel de confianza suponiendo una distribución normal**

Nivel de confianza p (%)	Factor de cobertura $k_p$
68.27	1
90	1.645
95	1.960
95.45	2
99	2.576
99.73	3

### 2.2.2. Selección del método

El laboratorio debe usar métodos y procedimientos apropiados para todas las actividades de laboratorio y, cuando sea apropiado, para la evaluación de la incertidumbre de medición, así como también las técnicas estadísticas para el análisis de datos. **(ISO/IEC, 2017)**

### 2.2.3. Validación de métodos

Según el VIM la validación de método es la verificación de que los requisitos especificados son adecuados para un uso previsto.

EJEMPLO Un procedimiento de medida, habitualmente utilizado para la medición de la concentración en masa de nitrógeno en agua, puede también validarse para la medición en el suero humano. **(JCGM 200, 2012)**

La versión más reciente de la definición de validación se presenta en la norma ISO 9000:2000 en donde se indica que la validación es la confirmación y provisión de evidencia objetiva de que se cumplen los requisitos para un uso o aplicación prevista. **(Lazos Martínez & Hernández Gutiérrez, 2004)**

La validación se vuelve necesaria cuando se plantea el problema de asegurar que la herramienta propuesta sirva para satisfacer una función determinada, un uso previsto. Se asume que tal herramienta no ha sido probada previamente para esa función. Algunos ejemplos de funciones con sus respectivas herramientas se muestran en la Tabla 4. Es notable que una misma función pueda requerir de varias herramientas aplicadas de manera sucesiva o simultánea, cada una de las cuales debe ser probada; e inversamente, una herramienta puede ser útil para varias funciones. **(Lazos Martínez & Hernández Gutiérrez, 2004).**

**Tabla 4. Ejemplo de funciones y herramientas**

<b>Función</b>	<b>Herramienta</b>
Determinar la acidez de una muestra líquida	Sistema de medición
Estimar la incertidumbre de la medida de dureza	Modelo
Calibrar un tornillo micrométrico	Método
Calibrar un tornillo micrométrico	Patrón
Calibrar un tornillo micrométrico	Servicio
Simular el movimiento de una mecanismo	Software

Las funciones se asocian con requisitos, y las herramientas con características de desempeño, de modo tal que pueda compararse cada requisito con la característica de desempeño correspondiente. Por ejemplo, puede hablarse de que la función

- a) determinar la acidez tiene como requisitos: la trazabilidad de los resultados a una referencia internacional, una incertidumbre de la medición no mayor a 5%, un costo no mayor a un determinado monto;
- b) calibrar un tornillo micrométrico tiene como requisitos: la trazabilidad de los resultados al metro como unidad SI; una incertidumbre de medición máxima de 5  $\mu\text{m}$ , que pueda ser efectuada a temperaturas con variaciones de 20 °C  $\pm$  3 °C. **(Lazos Martínez & Hernández Gutiérrez, 2004)**

Para cada requisito se encuentra una característica de desempeño. Por ejemplo, para el requisito trazabilidad de los resultados de la función determinar la acidez, la característica puede ser la desviación del valor de la referencia; para el requisito incertidumbre máxima de 5% está la incertidumbre obtenida en la determinación, etc. Además, debe notarse que el cumplimiento de cada requisito puede estar asociado a diferentes herramientas. En la función calibrar un tornillo micrométrico, los tres requisitos especificados se asocian con las tres herramientas mostradas. **(Lazos Martínez & Hernández Gutiérrez, 2004)**

El resultado de una validación es una declaración sobre el cumplimiento, o incumplimiento, de los requisitos para el uso o aplicación dada, sustentada en evidencias, necesariamente objetivas. **(Lazos Martínez & Hernández Gutiérrez, 2004)**

La norma ISO/IEC 17025 indica en el apartado 7.2.2.1 que “El laboratorio debe validar los métodos no normalizados, los métodos desarrollados por el laboratorio y los métodos normalizados utilizados fuera de su alcance previsto o modificados de otra forma. La validación debe ser tan amplia como sea necesaria para satisfacer las necesidades de la aplicación o del campo de aplicación dados.” **(ISO/IEC, 2017)**

Las técnicas utilizadas para la validación del método pueden ser una de las siguientes o una combinación de ellas:

- a) la calibración o evaluación del sesgo y precisión utilizando patrones de referencia o materiales de referencia;
- b) una evaluación sistemática de los factores que influyen en el resultado;
- c) la robustez del método de ensayo a través de la variación de parámetros controlados, tales como la temperatura de la incubadora, el volumen suministrado;
- d) la comparación de los resultados obtenidos con otros métodos validados;
- e) las comparaciones interlaboratorio;

f) la evaluación de la incertidumbre de medición de los resultados basada en la comprensión de los principios teóricos de los métodos y en la experiencia práctica del desempeño del método de muestreo o ensayo. **(ISO/IEC, 2017)**

#### 2.2.4. Estudios R&R

En los estudios R&R se evalúa de modo experimental qué parte de la variabilidad total observada en los datos es atribuible al error de medición; además, este estudio permite cuantificar si este error es mucho o poco en comparación con la variabilidad del producto y con las tolerancias de la característica de calidad que se mide. Las fuentes de variabilidad que se pueden evaluar en un estudio largo de repetibilidad y reproducibilidad son: variabilidad del producto, del instrumento y de los operadores. **(Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2009)**

Sean  $\sigma_{total}^2$  la variabilidad total observada;  $\sigma_{prod}^2$  la varianza atribuible al producto (partes o piezas),  $\sigma_{instr}^2$  la variabilidad o error del instrumento de medición y  $\sigma_{oper}^2$  la variabilidad o error debido a operadores, entonces se cumple la siguiente relación:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{prod}^2 + \sigma_{oper}^2 + \sigma_{instr}^2 \quad (10)$$

Donde

$$\sigma_{instr}^2 = \sigma_{repeti}^2 \quad y \quad \sigma_{oper}^2 = \sigma_{reprod}^2 \quad (11)$$

Por lo tanto, el error o variabilidad de las mediciones debido a repetibilidad y reproducibilidad se obtiene con

$$\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{repeti}^2 + \sigma_{reprod}^2 \quad (12)$$

##### 2.2.4.1. Estudio R&R corto

Un estudio de repetibilidad y reproducibilidad corto permite estimar de manera rápida la variabilidad con la que contribuye el proceso de medición; sin embargo, con este estudio no es posible separar la repetibilidad (instrumento) de la reproducibilidad (operadores), sino que vienen de manera mezclada. **(Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2009)**

### **2.2.5. Batería**

La batería de acuerdo a la definición del Vocabulario Electrotécnico. Parte 482: Pilas y Acumuladores Eléctricos (IEC 60050-482:2004, IDT) es uno o varios elementos equipados con los dispositivos necesarios para su utilización, por ejemplo, la caja, los bornes, el marcado y los dispositivos de protección. **(NTE INEN-IEC, 2014)**

Cada batería contiene 6 celdas individualmente separadas y conectadas en serie, en una caja de polipropileno. Cada celda contiene un elemento que está compuesto de placas positivas, negativas y material de aislamiento (separadores) entre las placas de polaridad opuesta.

#### **2.2.5.1. Funcionamiento de batería**

Las baterías son fuentes de energía electroquímica capaz de acumular, almacenar y liberar energía eléctrica debido a las reacciones electroquímicas reversibles. Estos procesos se ubican en los electrodos negativos y positivos de cada celda electroquímica. **(Kirchev, 2015)**

Normalmente cada electrodo se compone de un material activo (a menudo un medio poroso) en contacto con un colector de corriente. Ambos electrodos están conectados galvánicamente por el electrolito que contiene iones (cargas) y en ciertos casos parte del material activo. El funcionamiento de la batería (su carga, descarga y permanencia en circuito abierto) es fuertemente no lineal. Este comportamiento complejo se puede relacionar con dos tipos de fenómenos -

reacciones electroquímicas que involucran la participación conjunta de moléculas, iones y electrones y fenómenos de transporte como la difusión y convección de especies desde el volumen del electrolito hacia la superficie del electrodo, así como hacia atrás desde la superficie del electrodo al volumen del electrolito. Los componentes de la batería (como colectores de corriente y separadores) pueden estar expuestos al contacto con diversos agentes corrosivos químicamente agresivos como el electrolito. **(Kirchev, 2015)**

## **2.2.6. Ensayos Eléctricos**

Los ensayos eléctricos principales son: capacidad de reserva, capacidad de 20 h y desempeño de arranque en frío a  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a continuación, se describe el ensayo de acuerdo a los procedimientos descritos en la norma IEC 60095-1:2018.

### **2.2.6.1. Capacidad de 20 h**

La capacidad efectiva de 20 h  $C_e$  se debe determinar por la descarga de una batería con corriente constante  $I_n$  a  $U_f = 10.50\text{ V}$ . El tiempo de descarga que resulta, en horas, se utiliza para la verificación de la capacidad nominal  $C_n$ . **(IEC 60095-1, 2018)**

### **2.2.6.2. Capacidad de reserva**

La capacidad de reserva efectiva  $C_{Re}$  se debe determinar por la descarga de la batería con la corriente constante  $I = 25\text{ A}$ , a  $U_f = 10.50\text{ V}$ . El tiempo de descarga que resulta, en minutos, se utiliza para la verificación de la capacidad de reserva nominal  $C_{Rn}$ . **(IEC 60095-1, 2018)**

### **2.2.6.3. Desempeño de Arranque en Frío**

Para una batería que suministra energía eléctrica al motor de arranque, la capacidad de arranque en temperaturas bajas es importante ya que es requerida

por normas internacionales para baterías. La corriente de arranque en frío o los amperios de arranque en frío son la medida de su capacidad de arranque.

El desempeño de arranque es la corriente de descarga  $I_{cc}$ , como se indica por el fabricante, que una batería puede suministrar, el mismo está dado en amperios. Él depende del material activo (número de placas, área de superficie de las placas), cuanto mayor sea el área de contacto entre el material de plomo y el electrolito, más alta será la corriente que puede ser suministrada por un corto período.

#### **2.2.6.3.1. Desempeño de Arranque en Frío a -18 °C – Opción 1**

El desempeño de arranque opción 1, consiste en realizar una descarga a la batería con una corriente  $I_{cc}$ , durante 10 segundos, luego de un período de reposo de 10 segundos, se debe descargar la misma a una corriente  $0.6 I_{cc}$  hasta que el voltaje de la batería alcance 6 V, el tiempo debe ser registrado. **(IEC 60095-1, 2018)**

#### **2.2.6.3.2. Desempeño de Arranque en Frío a -18 °C – Opción 2**

El desempeño de arranque opción 2, consiste en realizar una descarga a la batería con una corriente  $I_{cc}$ , durante 30 segundos. **(IEC 60095-1, 2018)**

# CAPÍTULO 3

## 3. METODOLOGÍA

Para la ejecución de este trabajo se hizo uso de resultados de ensayos eléctricos de “Capacidad de 20 h del año 2019, los cuales se ejecutaron en el Laboratorio de Control de Calidad, perteneciente a una empresa que reside en la ciudad de Guayaquil y que se dedica a la fabricación de baterías de plomo-ácido de 12 V”.

Conforme a la GUM, se llevan a cabo 6 pasos para encontrar la incertidumbre de una medición:

- 1) Elaboración de un modelo (matemático) de la medición.
- 2) Identificación de fuentes de incertidumbre.
- 3) Evaluación de incertidumbre estándar.
- 4) Determinación de incertidumbre estándar combinada.
- 5) Determinación de incertidumbre expandida.
- 6) Expresión de la incertidumbre

Antes de entrar en materia, es importante mencionar las consideraciones a tomar en cuenta para realizar el estudio R&R corto, el mismo que se usará para validar el método en ensayo.

El estudio R&R corto, permite estimar de manera rápida la variabilidad con la que contribuye el proceso de medición, los pasos a seguir en un estudio de corto se detallan a continuación:

- Seleccionar dos o más operadores para realizar el estudio sobre un instrumento de medición
- Seleccionar un conjunto de cinco a diez unidades que serán medidas por cada uno de los dos analistas. Las unidades o piezas no tienen que ser

homogéneas; pueden seleccionarse aleatoriamente o elegirse de manera que cubran todo el rango en que opera el equipo. Cada pieza se medirá sólo una vez por cada operador.

- Etiquetar cada unidad y aleatorizar el orden en el cual son dadas a cada uno de los analistas para que sean medidas.
- Identificar la zona a punto en la parte donde la medición será tomada y el método o técnica que se debe aplicar.
- Hacer el análisis estadístico de los datos, emitir un juicio sobre la calidad del proceso de la medición y decidir acciones futuras sobre el mismo. **(Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2009)**

Las consideraciones prácticas a tomar en cuenta para realizar la estimación de la incertidumbre son:

1. Si se hacen variar todas las magnitudes de las que depende el resultado de una medición, su incertidumbre puede evaluarse por métodos estadísticos. En la práctica, sin embargo, esto no es posible, por limitaciones de tiempo y de recursos; por ello, la incertidumbre de un resultado de medida se evalúa acudiendo a un modelo matemático de la medición y a la ley de la propagación de la incertidumbre. La hipótesis de que a toda medición puede hacerse corresponder a un modelo matemático, hasta el grado impuesto por la exactitud requerida en la medición.
2. Dado que el modelo matemático puede ser incompleto, deben hacerse variar de forma práctica, hasta el grado máximo posible, todas las magnitudes relevantes, con objeto de que la evaluación de la incertidumbre esté basada tanto como sea posible en los datos observados. Cuando sea factible, la utilización de modelos empíricos de la medición, basados en datos cuantitativos observados durante un largo plazo, así como el uso de normativas de verificación y gráficos de control que indiquen que la medición está bajo control estadístico, debe ser parte del esfuerzo para obtener evaluaciones fiables de la incertidumbre. El modelo matemático debe revisarse cuando los datos obtenidos, incluyendo aquí los resultados de

determinaciones independientes del mismo mensurando, demuestren que el modelo es incompleto. Un ensayo bien concebido puede facilitar en gran medida la consecución de evaluaciones fiables de la incertidumbre, siendo esta una parte importante del arte de la medición.

3. Con el fin de decidir si un sistema de medida funciona correctamente, a menudo se compara la variabilidad observada experimentalmente de sus valores de salida, caracterizada por su desviación típica, con la desviación típica esperada, obtenida mediante combinación de las distintas componentes de incertidumbre que caracterizan la medición. En tales casos, solamente deben considerarse aquellas componentes (hayan sido obtenidas por evaluación Tipo A o Tipo B) que puedan contribuir a la variabilidad observada experimentalmente, de los valores de salida.
4. En algunos casos, la incertidumbre de la corrección de un efecto sistemático no necesita ser incluida en la evaluación de la incertidumbre del resultado de medida. A pesar de haber realizado la evaluación de dicha incertidumbre, ésta puede despreciarse si su contribución a la incertidumbre típica combinada del resultado de medida es insignificante. Incluso la propia corrección puede ser ignorada, si el valor relativo de ésta con respecto a la incertidumbre típica combinada, es también despreciable.
5. En la práctica ocurre a menudo, especialmente en el campo de la metrología legal, que un instrumento es verificado mediante comparación con un patrón de medida, y las incertidumbres asociadas al patrón y al procedimiento de comparación son despreciables respecto a la exactitud exigida por el ensayo. Un ejemplo de esto es la utilización de un juego de patrones de masa calibrados, para verificar la exactitud de una balanza comercial. En tales casos, dado que las componentes de la incertidumbre son lo suficientemente pequeñas como para poder ser ignoradas, la medición puede entenderse como una forma de determinar el error del instrumento en ensayo
6. La estimación del valor de un mensurando, proporcionada por el resultado de una medición, se expresa a veces en función del valor adoptado para un patrón de medida, más que en función de la unidad específica del Sistema

Internacional de Unidades (SI). En tales casos, el orden de magnitud de la incertidumbre que puede atribuirse al resultado de medida, puede ser significativamente menor que si el resultado se expresara en la correspondiente unidad SI. (En efecto, el mensurando queda redefinido como la relación existente entre el valor de la magnitud bajo medición y el valor adoptado para el patrón).

7. Equivocaciones a la hora de registrar o analizar los datos observados pueden dar lugar a errores significativos y desconocidos en el resultado de una medición. Los errores de bulto pueden detectarse fácilmente tras revisar los datos tomados; los pequeños pueden quedar enmascarados, o parecer incluso variaciones aleatorias. La estimación de la incertidumbre no se ocupa de tales errores. **(JCGM 100, 2008)**

### 3.1. Elaboración del modelo matemático de la medición

En la mayor parte de los casos, un mensurando  $Y$  no se mide directamente, sino que se determina a partir de otras  $N$  magnitudes  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , por medio de una relación funcional  $f$ :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (13)$$

Las *magnitudes de entrada*  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , de las que depende la *magnitud de salida*  $Y$  pueden ser consideradas a su vez como mensurandos, pudiendo depender de otras magnitudes, junto con las correcciones y factores de corrección de los efectos sistemáticos, llegándose así a una relación funcional  $f$  compleja, que podría ser difícil de escribir en forma explícita.

Además, la función  $f$  puede determinarse experimentalmente o existir solamente en forma de algoritmo calculable numéricamente. La función  $f$  debe interpretarse en su concepto más amplio, como la función que contiene cada magnitud, incluyendo todas las correcciones y factores de corrección, susceptible de contribuir a una componente significativa de la incertidumbre del resultado de medida.

En consecuencia, si los datos indican que esta función  $f$  no representa la medición con el grado impuesto por la exactitud exigida por el resultado de medida, deben introducirse en  $f$  magnitudes de entrada adicionales, para eliminar la falta de adecuación. Podría ser necesario introducir una magnitud de entrada que reflejara el conocimiento incompleto de un fenómeno que afecta al mensurando.

El conjunto de magnitudes de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_N$  puede clasificarse en:

- magnitudes cuyos valores e incertidumbres se determinan directamente en el curso de la medición. Estos valores e incertidumbres pueden obtenerse, por ejemplo, a partir de una única observación, o a partir de observaciones repetidas, o por una decisión basada en la experiencia. Pueden implicar la determinación de correcciones para las lecturas de los instrumentos y correcciones debidas a las magnitudes de influencia, tales como la temperatura ambiente, la presión atmosférica o la humedad;
- magnitudes cuyos valores e incertidumbres se introducen en la medición procedente de fuentes externas, tales como magnitudes asociadas a patrones, a materiales de referencia certificados y a valores de referencia tomados de publicaciones.

Una estimación del mensurando  $Y$ , representada por  $y$ , se obtiene a partir de la ecuación (1) utilizando las estimaciones de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_N$  para los valores de  $N$  magnitudes  $X_1, X_2, \dots, X_N$ . Así, la *estimación de salida*  $y$ , que es el resultado de la medición, viene dada por:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (14)$$

La capacidad efectiva de 20 h  $C_e$  se calcula de la siguiente forma:

$$C_e = \frac{C_n}{20} x t \quad (15)$$

$I_n$  se calcula dividiendo  $C_n$  (capacidad nominal) para 20 horas.

Por lo tanto, resulta la siguiente ecuación:

$$C_e = I_n x t \quad (16)$$

En donde:

$C_e$ : es la capacidad efectiva de 20 h

$I_n$ : es la corriente nominal de descarga

$t$ : es el tiempo de descarga en horas

Entonces, para la capacidad efectiva de 20 h tenemos una función con dos magnitudes de influencia:

$$C_e = f(I_n, t) \quad (17)$$

La desviación típica estimada asociada a la estimación de salida o resultado de medida  $y$ , denominada *incertidumbre típica combinada* y representada por  $uc(y)$ , se determina a partir de la desviación típica estimada, asociada a cada estimación de entrada  $x_i$ , denominada *incertidumbre típica* y representada por  $u(x_i)$ .

Cada estimación de entrada  $x_i$ , así como su incertidumbre asociada  $u(x_i)$  se obtienen a partir de una distribución de valores posibles de la magnitud de entrada  $X_i$ . Esta distribución de probabilidad puede basarse en una distribución de frecuencias; es decir, en una serie de observaciones  $X_{i,k}$  de las  $X_i$ , o puede tratarse de una distribución supuesta *a priori*. Las evaluaciones Tipo A de las componentes de la incertidumbre típica se basan en distribuciones de frecuencia mientras que las evaluaciones Tipo B se basan en distribuciones supuestas *a priori*. Debe tenerse en cuenta que, en los dos casos, las distribuciones son modelos utilizados para representar nuestro nivel de conocimiento.

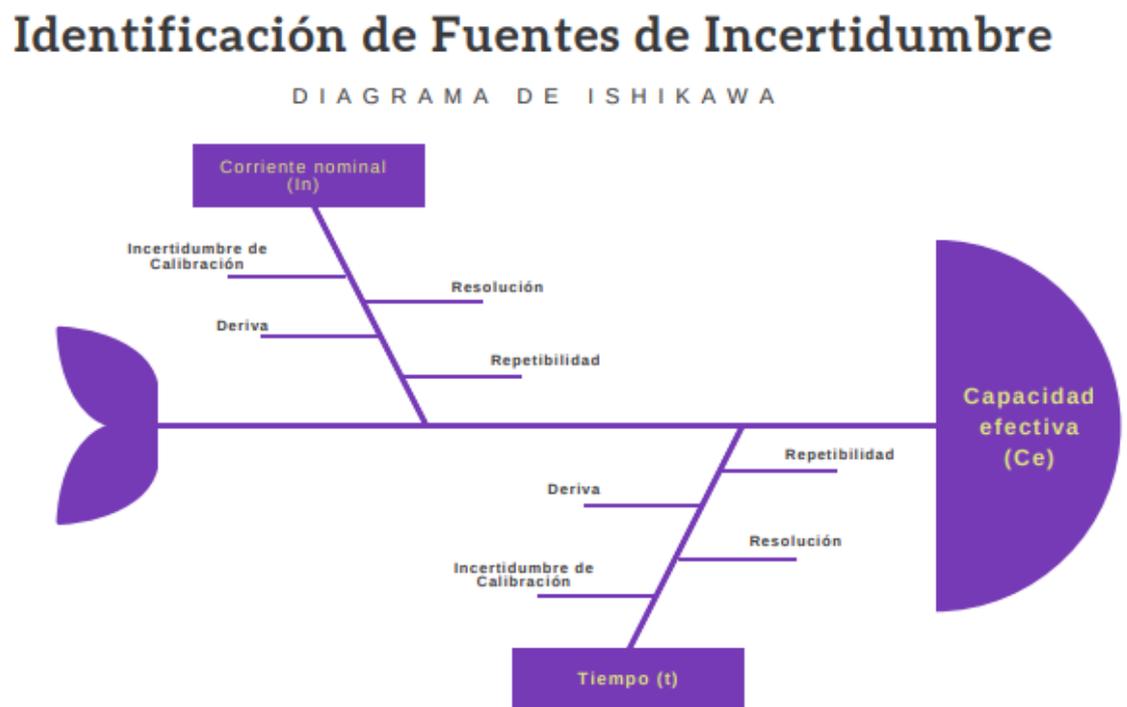
### **3.2. Identificación de fuentes de incertidumbre**

Una vez definido el modelo matemático, es hora de identificar las fuentes de incertidumbre, para ello se hizo uso de la herramienta diagrama de Ishikawa o más conocido como espina de pescado. Las principales fuentes de

incertidumbre están dadas por las dos magnitudes de entrada, las cuales son corriente y tiempo.

En la Figura 1, se observan las fuentes de incertidumbre asociadas a la magnitud de salida  $C_e$ :

**Figura 1** Diagrama de Ishikawa de fuentes de incertidumbre



Las dos fuentes de incertidumbre corresponden a las magnitudes de entrada: Corriente nominal ( $I_n$ ) y tiempo ( $t$ ). Cada una de estas magnitudes tiene asociada las siguientes fuentes de incertidumbre como: incertidumbre de la calibración, de la resolución, incertidumbre por deriva y repetibilidad.

### 3.3. Evaluación de incertidumbre estándar

La Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición (GUM) ha adoptado el enfoque de agrupar las componentes de la incertidumbre en dos

categorías en función de su método de evaluación, Tipo A y Tipo B. Esta categorización de los métodos de evaluación, en lugar de los componentes en sí mismos, evita ciertas ambigüedades.

La evaluación de tipo A se lleva a cabo mediante cálculo a partir de una serie de observaciones repetidas, utilizando métodos estadísticos.

La evaluación de Tipo B se lleva a cabo por medios distintos a los utilizados para el Tipo A.

Las incertidumbres individuales se evalúan mediante el método apropiado y cada una se expresa como una **desviación estándar** y se denomina **incertidumbre estándar**.

### 3.3.1. Evaluación tipo A de la incertidumbre típica

En la mayor parte de los casos, la mejor estimación disponible de la esperanza matemática  $\mu_q$  de una magnitud  $q$  que varía al azar (es decir, de una variable aleatoria) de la que se han obtenido  $n$  observaciones independientes  $q_k$  en las mismas condiciones de medida, es la media aritmética  $\bar{q}$  de las  $n$  observaciones:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (18)$$

Así, para una magnitud de entrada  $X_i$  estimada a partir de  $n$  observaciones repetidas e independientes  $X_{i,k}$ , la media aritmética  $\bar{X}_i$  obtenida mediante la ecuación (18) es utilizada como estimación de entrada  $x_i$  en la ecuación:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (19)$$

para determinar el resultado de medida  $y$ , tomándose pues  $x_i = \bar{X}_i$ .

Los valores de las observaciones individuales  $q_k$  difieren en razón de las variaciones aleatorias de las magnitudes de influencia o de efectos aleatorios. La varianza experimental de las observaciones, que estima la varianza  $\sigma^2$  de la distribución de probabilidad de  $q$ , viene dada por:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (20)$$

Esta estimación de la varianza y su raíz cuadrada positiva  $s(q_k)$ , denominada **desviación típica experimental**, representan la variabilidad de los valores observados  $q_k$ , o más específicamente, su dispersión alrededor de su media  $\bar{q}$ .

La mejor estimación de  $\sigma^2(\bar{q}) = \sigma^2/n$ , varianza de la media, viene dada por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (21)$$

La varianza experimental de la media  $s^2(\bar{q})$  y la **desviación típica experimental de la media**  $s(\bar{q})$ , igual a la raíz cuadrada positiva de  $s^2(\bar{q})$ , determinan la bondad con que  $\bar{q}$  estima la esperanza matemática  $\mu_q$  de  $q$ , y una u otra pueden ser utilizadas como medida de la incertidumbre de  $q$ .

De este modo, para una magnitud de entrada  $X_i$  obtenida a partir de  $n$  observaciones repetidas e independientes  $X_{i,k}$ , la incertidumbre típica  $u(x_i)$  de su estimación  $x_i = \bar{X}_i$  es  $u(x_i) = s(\bar{X}_i)$ , con  $s^2(\bar{X}_i)$ . Por comodidad,  $u^2(x_i) = s^2(\bar{X}_i)$  y  $u(x_i) = s(\bar{X}_i)$  son a veces llamadas *varianza Tipo A* e *incertidumbre típica tipo A*, respectivamente.

Es importante que el número de observaciones  $n$  debe ser suficientemente grande para garantizar que  $q$  proporcione una estimación fiable de la esperanza matemática  $\mu_q$  de la variable aleatoria  $q$ , y para que  $s^2(\bar{q})$  proporcione una estimación fiable de la varianza  $\sigma^2(\bar{q}) = \sigma^2/n$ . La diferencia entre  $s^2(\bar{q})$  y  $\sigma^2(\bar{q})$  debe tomarse en consideración cuando se determinan intervalos de confianza. En este caso, si la distribución de probabilidad de  $q$  es

una distribución normal, la diferencia se tiene en cuenta mediante la distribución- $t$ .

Aunque la varianza  $s^2(\bar{q})$  es la magnitud fundamental, la desviación típica  $s(\bar{q})$  es, en la práctica, más cómoda de utilizar porque posee la misma dimensión que  $q$  y un valor más significativo que el de la varianza.

Frecuentemente, la estimación  $x_i$  de una magnitud de entrada  $X_i$  se obtiene a partir de una curva ajustada a resultados experimentales por el método de mínimos cuadrados. Las varianzas estimadas y las incertidumbres típicas resultantes de los parámetros de ajuste característicos de la curva y de cualesquiera puntos predecibles pueden calcularse habitualmente por procedimientos estadísticos conocidos.

El número de **grados de libertad**  $\nu_i$  de  $u(x_i)$  igual a  $n - 1$  en el caso más sencillo, donde  $x_i = \bar{X}_i$  y  $u(x_i) = s(\bar{X}_i)$ , se calcula a partir de  $n$  observaciones independientes y debe figurar siempre que se indiquen las evaluaciones Tipo A de las componentes de la incertidumbre.

Si existe una correlación entre las variaciones aleatorias de las observaciones de una magnitud de entrada, por ejemplo, en función del tiempo, la media y la desviación típica experimental de la media, pueden ser **estimadores** inadecuados de los **estadísticos** buscados. En tales casos, las observaciones deben analizarse por métodos estadísticos especialmente diseñados para tratar series de mediciones correlacionadas variando aleatoriamente.

Estos métodos especiales se utilizan para tratar las mediciones de patrones de frecuencia. Sin embargo, también es posible utilizarlos en mediciones de otras magnitudes metrológicas, cuando se pasa de mediciones a corto plazo a mediciones a largo plazo, donde la hipótesis de variaciones aleatorias no correlacionadas pudiera no ser válida.

La discusión sobre la evaluación Tipo A de la incertidumbre típica no pretende ser exhaustiva; existen numerosas situaciones, algunas relativamente complejas, que pueden tratarse por métodos estadísticos. Un ejemplo importante se refiere a la utilización de modelos de calibración, a menudo basados en el método de mínimos cuadrados, para evaluar las incertidumbres procedentes de variaciones aleatorias, tanto a corto como a largo plazo, de los resultados de comparaciones de patrones materializados de valor desconocido, tales como bloques patrón o patrones de masa, con patrones de referencia de valor conocido. En tales situaciones de medida, relativamente sencillas, las componentes de la incertidumbre pueden evaluarse frecuentemente mediante análisis estadístico de los datos obtenidos a partir de diseños experimentales, consistentes en secuencias anidadas de mediciones del mensurando, para diferentes valores de las magnitudes de las que depende - esta técnica se denomina análisis de la varianza, ANOVA.

NOTA En los niveles inferiores de la cadena de calibración, en los que se supone frecuentemente que los patrones de referencia son conocidos con exactitud, por haber sido calibrados en un laboratorio nacional o primario, la incertidumbre de un resultado de calibración puede ser una simple incertidumbre típica tipo A, evaluada mediante la desviación típica experimental obtenida a partir de un conjunto acumulado de resultados, que representa al mensurando. **(JCGM 100, 2008)**

### **3.3.2 Evaluación tipo B de la incertidumbre típica**

Para una estimación  $x_i$  de una magnitud de entrada  $X_i$  no obtenida a partir de observaciones repetidas, la varianza estimada asociada  $u^2(x_i)$  o la incertidumbre típica  $u(x_i)$  se establecen mediante decisión científica basada en toda la información disponible acerca de la variabilidad posible de  $X_i$ . El conjunto de la información puede comprender:

- resultados de mediciones anteriores;

- experiencia o conocimientos generales sobre el comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos utilizados;
- especificaciones del fabricante;
- datos suministrados por certificados de calibración u otros tipos de certificados;
- incertidumbres asignadas a valores de referencia procedentes de libros y manuales.

Por conveniencia, los valores  $u^2(x_i)$  y  $u(x_i)$  así evaluados, se denominan respectivamente *varianza Tipo B* e *incertidumbre típica Tipo B*.

La utilización correcta del conjunto de informaciones disponibles para una evaluación Tipo B de la incertidumbre típica se fundamenta en la experiencia y en el conocimiento general, siendo ésta una disciplina que puede aprenderse con la práctica. No debe olvidarse que una evaluación Tipo B de la incertidumbre típica puede ser tan fiable como una evaluación Tipo A, especialmente en situaciones en las que una evaluación Tipo A se basa en un número relativamente pequeño de observaciones estadísticamente independientes.

Si la estimación  $x_i$  se obtiene a partir de una especificación del fabricante, de un certificado de calibración, de una publicación o de otra fuente, y su incertidumbre viene dada como un múltiplo específico de una desviación típica, la incertidumbre típica  $u(x_i)$  es simplemente el cociente entre el valor indicado y el factor multiplicador, y la varianza estimada  $u^2(x_i)$  es el cuadrado de dicho cociente.

La incertidumbre de  $x_i$  no siempre viene expresada como un múltiplo de una desviación típica. En su lugar, puede definir un intervalo correspondiente a un nivel de confianza del 90, 95 ó 99 por ciento. Salvo indicación en contra, puede suponerse que se ha utilizado una **distribución normal** para calcular la incertidumbre, obteniéndose la incertidumbre típica de  $x_i$  mediante simple división del valor de incertidumbre dado por el factor correspondiente de la distribución normal. Dicho factor, para los tres niveles de confianza citados, es 1,64; 1,96 y 2,58.

Tal hipótesis no es necesaria si la incertidumbre se da siguiendo las recomendaciones de esta Guía, la cual subraya que siempre debe citarse el factor de cobertura utilizado. Por ejemplo: Un certificado de calibración indica que el valor  $R_s$  de una resistencia patrón de valor nominal  $10 \Omega$  es  $10,000\ 742 \Omega \pm 129 \mu\Omega$  a  $23^\circ\text{C}$ , y que “la incertidumbre indicada de  $129 \mu\Omega$  define un intervalo con nivel de confianza del 99 por ciento”. La incertidumbre típica del valor de la resistencia puede suponerse que es  $u(R_s) = (129 \mu\Omega) / 2,58 = 50 \mu\Omega$ , que corresponde a una incertidumbre típica relativa  $u(R_s)/R_s$  de  $5,0 \times 10^{-6}$ . La varianza estimada es  $u^2(R_s) = (50 \mu\Omega)^2 = 2,5 \times 10^{-9} \Omega^2$ .

Consideremos el caso en que, en base a las informaciones disponibles, puede afirmarse que “existe una probabilidad del 50 % de que el valor de la magnitud de entrada  $X_i$  esté comprendido en el intervalo de  $a^-$  a  $a^+$ ”. Si puede suponerse que los valores posibles de  $X_i$  se distribuyen aproximadamente según una distribución normal, entonces la mejor estimación  $x_i$  de  $X_i$  puede tomarse en el centro del intervalo. Además, si la semiamplitud del intervalo es  $a = (a^+ - a^-)/2$ , puede tomarse  $u(x_i) = 1,48a$ , ya que, para una distribución normal de esperanza matemática  $\mu$  y desviación típica  $\sigma$ , el intervalo  $\mu \pm \sigma / 1,48$  cubre aproximadamente el 50 % de la distribución.

### 3.3.2.1 Distribución de probabilidad

La distribución de probabilidad de la cantidad medida describe la variación en la probabilidad del valor verdadero que se encuentra en cualquier diferencia particular del resultado medido o asignado. La forma de la distribución de probabilidad a menudo no se conocerá, y una suposición debe ser realizada, basado en conocimientos o teorías previas, que se aproximan a una de las formas comunes. Entonces es posible calcular la incertidumbre estándar,  $U(x_i)$ , para la forma asignada de expresiones simples. Las cuatro distribuciones principales de interés son:

- normal;
- rectangular;

- triangular;
- forma de U. **(GUIDE IEC 115, 2007)**

### 3.3.2.1.1 Distribución normal

La distribución normal se asigna cuando la incertidumbre se toma de, por ejemplo, un certificado / informe de calibración donde se indica el factor de cobertura, k. La incertidumbre estándar se obtiene dividiendo la incertidumbre declarada del certificado de calibración por su factor de cobertura k, que es k = 2 para un nivel de confianza de aproximadamente el 95%. **(GUIDE IEC 115, 2007)**

$$u(x_i) = \frac{\text{incertidumbre}}{k} \quad (22)$$

### 3.3.2.1.2 Distribución rectangular

La distribución rectangular significa que la densidad de probabilidad es constante dentro de los límites prescritos. Debería asignarse una distribución rectangular cuando los límites de especificación del fabricante se utilicen como incertidumbre, a menos que haya una declaración de confianza asociada con la especificación, en cuyo caso se puede suponer una distribución normal.

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}} \quad (23)$$

Donde  $a_i$  es la mitad del ancho de la distribución rectangular. **(GUIDE IEC 115, 2007)**

### 3.3.2.1.3 Distribución triangular

La distribución triangular significa que la probabilidad de que el valor verdadero se encuentre en un punto entre dos límites prescritos aumenta uniformemente desde cero en los extremos hasta el máximo en el centro. Se debe asignar una distribución triangular donde la contribución tiene una distribución con límites definidos y donde la mayoría de los valores entre los límites se encuentran alrededor del punto central.

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{6}} \quad (24)$$

Donde  $a_i$  es la mitad del ancho de la distribución rectangular. (**GUIDE IEC 115, 2007**)

#### 3.3.2.1.4 Distribución en forma U

La distribución en forma de U es aplicable a la incertidumbre por desajuste. El valor del límite para la incertidumbre de desajuste,  $M$ , asociado con la transferencia de potencia en una unión. La incertidumbre del desajuste es asimétrica con respecto al resultado medido; sin embargo, la diferencia que esto supone en la incertidumbre total suele ser insignificante y es aceptable utilizar el mayor de los dos límites. La distribución en forma de U se utiliza para fines de EMC, pero también para el control climático de la temperatura y humedad.

$$u(x_i) = \frac{M}{\sqrt{2}} \quad (25)$$

### 3.4 Determinación de incertidumbre típica combinada

#### 3.4.1 Magnitudes de entrada no correlacionadas

Este apartado trata el caso en que todas las magnitudes de entrada son **independientes**.

Para que el enfoque estadístico de la combinación de contribuciones de incertidumbre individuales sea válido, no debe haber factores comunes asociados con estas contribuciones.

El efecto de las cantidades de entrada correlacionadas puede aumentar o disminuir la incertidumbre estándar combinada. Por ejemplo, si el área de un rectángulo se determina midiendo su ancho y alto utilizando el mismo instrumento de medición, la correlación aumentará la incertidumbre. Por otro lado, si se midiera un bloque patrón por comparación con otro de material idéntico, el efecto de la incertidumbre

por temperatura dependerá de la diferencia de temperatura entre los dos bloques y, por tanto, tenderá a anularse.

Si la correlación es tal que aumenta la incertidumbre estándar combinada, el enfoque más sencillo es agregar las incertidumbres estándar para estas cantidades antes de combinar el resultado estadísticamente con otras contribuciones.

Sin embargo, si la correlación es tal que la incertidumbre estándar combinada se reducirá, como en la comparación del bloque patrón anterior, la diferencia en la incertidumbre estándar se usaría como la cantidad de entrada. (GUIDE IEC 115, 2007)

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  $u_c(y)$ .

La incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$  es la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada  $u_c^2(y)$ , dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (26)$$

donde  $f$  es la función dada en la ecuación. Cada  $u(x_i)$  es una incertidumbre típica evaluada como se describe en evaluación Tipo A o en evaluación Tipo B. La incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$  es una desviación típica estimada y caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando  $Y$ .

La ecuación (26) y su equivalente para las magnitudes de entrada correlacionadas, ecuación, basadas ambas en un desarrollo en serie de Taylor de primer orden de  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ , expresan lo que en la Guía GUM se denomina ley de propagación de la incertidumbre.

Las derivadas parciales  $\partial f/\partial x_i$  son iguales a  $\partial f/\partial X_i$ , calculadas para  $X_i = x_i$ . Estas derivadas, frecuentemente denominadas **coeficientes de sensibilidad**, describen cómo varía la estimación de salida  $y$ , en función de las variaciones en los valores de las estimaciones de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_N$ . En particular, la variación de  $y$  producida por una pequeña variación  $\Delta x_i$  en la estimación de entrada  $x_i$  viene dada por  $(\Delta y)_i = (\partial f/\partial x_i) (\Delta x_i)$ . Si esta variación es debida a la incertidumbre típica de la estimación  $x_i$ , la variación correspondiente de  $y$  es  $(\partial f/\partial x_i) (u x_i)$ . La varianza combinada  $u_c^2(y)$  puede considerarse entonces como una suma de términos, cada uno de ellos representando la varianza estimada asociada a  $y$ , debido a la varianza estimada asociada a cada estimación de entrada  $x_i$ . Esto conduce a escribir la ecuación (26) en la forma:

$$u_c^2(y) = \sum_{j=1}^N [c_j u(x_j)]^2 \equiv \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (27)$$

Donde

$$c_i \equiv (\partial f/\partial x_i), \quad u_i(y) \equiv |c_i| u(x_i) \quad (28)$$

La incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$  puede calcularse numéricamente reemplazando  $c_i u(x_i)$  en la ecuación (27) por:

$$Z_i = \frac{1}{2} \{f[x_1, \dots, x_i + u(x_i), \dots, x_N] - f[x_1, \dots, x_i - u(x_i), \dots, x_N]\} \quad (29)$$

Es decir, que  $u_i(y)$  se evalúa numéricamente calculando la variación de  $y$  debida a variaciones de  $x_i$ , de valores  $+u(x_i)$  y  $-u(x_i)$ . El valor de  $u_i(y)$  puede entonces tomarse igual a  $|Z_i|$  y el valor del coeficiente de sensibilidad correspondiente  $c_i$  igual a  $Z_i/u(x_i)$ .

Partiendo de la ecuación (16) de nuestro modelo matemático y aplicando la ley de la propagación de la incertidumbre tenemos la siguiente expresión:

$$c_1 \equiv \frac{\partial C_e}{\partial I_n} = t \quad (30)$$

$$c_2 \equiv \frac{\partial C_e}{\partial t} = I_n \quad (31)$$

$$u_c^2(C_e) = \left[ \frac{\partial C_e}{\partial I_n} \right]^2 u^2(I_n) + \left[ \frac{\partial C_e}{\partial t} \right]^2 u^2(t) \quad (32)$$

$$u_c^2(C_e) = [c_1 u(I_n)]^2 + [c_2 u(t)]^2 \quad (33)$$

### 3.4. Determinación de la incertidumbre expandida

La nueva expresión de la incertidumbre, que satisface la exigencia de proporcionar un intervalo, se denomina incertidumbre expandida, y se representa por  $U$ . La incertidumbre expandida  $U$  se obtiene multiplicando la incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$  por un factor de cobertura  $k$ :

$$U = k u_c(y) \quad (34)$$

Resulta conveniente expresar el resultado de una medición en la forma  $Y = y \pm U$ , lo que se interpreta como la mejor estimación del valor atribuible al mensurando  $Y$  es  $y$ , y que puede esperarse que en el intervalo que va de  $y - U$  a  $y + U$  esté comprendida una fracción importante de la distribución de valores que podrían ser razonablemente atribuidos a  $Y$ . Tal intervalo puede también expresarse por  $y - U \leq Y \leq y + U$ .

Los conceptos intervalo de confianza y nivel de confianza tienen definiciones específicas en estadística y se aplican solamente al intervalo definido por  $U$  cuando se cumplen ciertas condiciones, incluida la definición de que todas las componentes de la incertidumbre que contribuyen a  $u_c(y)$  se obtengan mediante evaluaciones Tipo A. No se utiliza el término “confianza” para calificar el término “intervalo” referido al intervalo definido por  $U$ ; de la misma forma, tampoco se utiliza el concepto “nivel de confianza” en conexión con dicho intervalo. Más específicamente,  $U$  define, alrededor del resultado de medición, un intervalo que

comprende una fracción elevada  $p$  de la distribución de probabilidad representada por este resultado y su incertidumbre típica combinada, siendo  $p$  la probabilidad o nivel de confianza del intervalo.

Siempre que sea posible, debe estimarse e indicarse el nivel de confianza  $p$  asociado al intervalo definido por  $U$ . Debe tenerse en cuenta que el hecho de multiplicar  $u_c(y)$  por una constante no añade información nueva, sino que presenta en forma diferente la información previamente disponible. Sin embargo, también debe tenerse en cuenta que, en numerosos casos, el nivel de confianza  $p$  (especialmente para valores de  $p$  cercanos a 1) es bastante incierto, no solamente debido al limitado conocimiento de la distribución de probabilidad representada por  $y$  y por  $u_c(y)$  (particularmente en las regiones extremas), sino también por causa de la propia incertidumbre de  $u_c(y)$ . **(JCGM 100, 2008)**

### 3.5 Elección del factor de cobertura

El valor del factor de cobertura  $k$  se elige en función del nivel de confianza requerido para el intervalo  $y - U$  a  $y + U$ . En general,  $k$  toma un valor entre 2 y 3. No obstante, en aplicaciones especiales,  $k$  puede tomarse fuera de dicho margen de valores. La experiencia y el conocimiento amplio sobre la utilización de los resultados de medida pueden facilitar la elección de un valor conveniente para  $k$ .

Idealmente, debería poderse escoger un valor específico del factor de cobertura  $k$  que proporcionase un intervalo  $Y = y \pm U = y \pm k u_c(y)$  correspondiente a un nivel de confianza particular  $p$ , por ejemplo, un 95 o un 99 por ciento y, de forma equivalente, para un valor dado de  $k$ , debería ser posible enunciar de forma inequívoca el nivel de confianza asociado a dicho intervalo. Sin embargo, no es fácil lograr esto en la práctica puesto que se requiere un conocimiento amplio de la distribución de probabilidad caracterizada por el resultado de medida  $y$ , y su incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$ . Aunque estos parámetros son de importancia crítica, sin embargo no son suficientes por sí mismos para poder establecer intervalos con niveles de confianza exactamente conocidos.

No obstante, una propuesta más sencilla, es a menudo adecuada para series de mediciones donde la distribución de la probabilidad representada por  $y$  y  $u_c(y)$  es aproximadamente normal, y el número de grados efectivos de libertad de  $u_c(y)$  es significativo. Cuando este es el caso, el cual es frecuente en la práctica, se puede suponer que  $k = 2$  representa un intervalo con un nivel de confianza de aproximadamente el 95%, y que  $k = 3$  representa un intervalo con un nivel de confianza de aproximadamente el 99%.

## **3.6 Expresión de la incertidumbre**

### **3.6.1 Directrices generales**

En general, a medida que se asciende en la jerarquía de la medición, se requieren más detalles sobre la forma en que han sido obtenidos el resultado de medida y su incertidumbre. Sin embargo, en todos los niveles jerárquicos (actividades comerciales y reglamentarias sobre los mercados, ingeniería en la industria, instalaciones de calibración de bajo nivel, investigación y desarrollo industrial, investigación fundamental, patrones primarios y patrones de calibración industrial, laboratorios nacionales y BIPM) toda la información necesaria para poder evaluar el proceso de medición debe estar a disposición de todos aquellos que puedan necesitarla. La principal diferencia se refiere a que, en los niveles inferiores de la cadena jerárquica, mucha de la información necesaria puede estar disponible, publicada como informes sobre métodos de calibración o ensayo, especificaciones de ensayo, certificados de calibración y ensayo, manuales de instrucciones, normas internacionales o nacionales y reglamentaciones locales.

Cuando se proporcionan los detalles de una medición, incluyendo la forma de evaluar la incertidumbre del resultado, por referencia a documentos publicados, como es el caso frecuente de un certificado que incluye los resultados de calibración, es imperativo que dichos documentos estén actualizados, a fin de que sean compatibles con el procedimiento de medida aplicado.

Diariamente se efectúan numerosas mediciones tanto en la industria como en el comercio, sin ningún informe explícito de incertidumbre. Muchas de ellas son además efectuadas con instrumentos sujetos a calibración periódica o a inspección legal. Si se admite que los instrumentos cumplen sus especificaciones u otros documentos normativos existentes que les sean de aplicación, pueden deducirse las incertidumbres de sus indicaciones a partir de dichas especificaciones o de dichos documentos normativos.

Aunque en la práctica, la cantidad de información necesaria para documentar un resultado de medida depende de la utilización prevista, sin embargo, se mantiene el principio básico de que cuando se indica el resultado de medida y su incertidumbre, es mejor pecar por exceso de información que por defecto. Por ejemplo, se debe:

- a) describir claramente los métodos utilizados para calcular el resultado de medida y su incertidumbre, a partir de las observaciones experimentales y datos de entrada;
- b) listar todas las componentes de la incertidumbre, documentando totalmente la forma en que se han evaluado;
- c) presentar el análisis de los datos de forma que pueda seguirse fácilmente cada una de sus etapas, y que pueda repetirse de forma independiente, si es necesario, el cálculo del resultado obtenido;
- d) dar todas las correcciones y constantes utilizadas para el análisis, así como las fuentes utilizadas.

Una comprobación de la lista precedente consiste en preguntarse uno mismo “¿He proporcionado suficiente información, en forma lo bastante clara, para que mi resultado pueda ser actualizado posteriormente, si se dispone de nuevas informaciones o nuevos datos?”

### 3.6.2 Directrices específicas

Cuando se expresa el resultado de una medición, y la medida de su incertidumbre viene dada por medio de su incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$ , se debe:

- a) describir completamente la forma en que se ha definido el mensurando  $Y$ ;
- b) dar la estimación  $y$  del mensurando  $Y$ , y su incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$ , indicando siempre las unidades utilizadas para  $y$  y para  $u_c(y)$ ;
- c) aportar la incertidumbre típica combinada relativa  $u_c(y)/|y|$ ,  $|y| \neq 0$ , cuando proceda;
- d) proporcionar la información del informe detallado, o hacer referencia a algún documento que la incluya.

Si se considera útil para posibles usuarios del resultado de medida; por ejemplo, para facilitar cálculos posteriores de factores de cobertura, o para ayudar a entender la medición, puede(n) indicarse:

- la estimación del número efectivo de grados de libertad;
- las incertidumbres típicas combinadas Tipo A,  $u_{cA}(y)$ , y Tipo B,  $u_{cB}(y)$ , así como sus grados efectivos de libertad estimados

Cuando la incertidumbre de medida viene dada por  $u_c(y)$ , para evitar cualquier falsa interpretación, es preferible dar el resultado numérico de la medición mediante una de las cuatro formas siguientes. Como ejemplo se supone que la magnitud cuyo valor se expresa es un patrón de masa  $m_S$ , de valor nominal 100 g; las informaciones entre paréntesis pueden omitirse para mayor concisión, siempre que  $u_c$  se defina en cualquier parte del documento que expresa el resultado.

- 1) " $m_S = 100,021\ 47$  g, con (una incertidumbre típica combinada)  $u_c = 0,35$  mg".
- 2) " $m_S = 100,021\ 47$  (35) g, donde el número entre paréntesis es el valor numérico de (la incertidumbre típica combinada)  $u_c$  referida a las dos últimas cifras del resultado dado".

3) “ $m_S = 100,021\ 47\ (0.00035)$  g, donde el número entre paréntesis es el valor numérico de (la incertidumbre típica combinada)  $u_c$ , expresada en la misma unidad que el resultado dado”.

4) “ $m_S = (100,021\ 47 \pm 0,000\ 35)$  g, donde el número que sigue al símbolo  $\pm$  es el valor numérico de (la incertidumbre típica combinada)  $u_c$  y no un intervalo de confianza”.

La GUM recomienda que la forma con  $\pm$  debe evitarse en lo posible, ya que habitualmente se utiliza para indicar un intervalo correspondiente a un nivel alto de confianza, y puede confundirse con la incertidumbre expandida. Además, aunque la finalidad de la advertencia en 4) es prevenir tal confusión, el hecho de escribir  $Y = y \pm u_c(y)$  podría malinterpretarse, pudiendo entenderse, sobre todo si se omite accidentalmente el final de la frase de la advertencia, que se refiere a una incertidumbre expandida con  $k = 1$ , y que el intervalo  $y - u_c(y) \leq Y \leq y + u_c(y)$  tiene un nivel de confianza específico  $p$ ; es decir, aquel asociado a la distribución normal.

Cuando al resultado de una medición se acompaña la incertidumbre expandida  $U = k u_c(y)$ , se debe:

- describir completamente la forma en que se ha definido el mensurando  $Y$ ;
- indicar el resultado de la medición en la forma  $Y = y \pm U$ , y dar las unidades de  $y$ , y de  $U$ ;
- incluir la incertidumbre expandida relativa  $U/|y|$ ,  $|y| \neq 0$ , cuando proceda;
- dar el valor de  $k$  utilizado para obtener  $U$  [o, para facilitar al usuario el resultado, proporcionar tanto el valor de  $k$  como el de  $u_c(y)$ ];
- dar el nivel de confianza aproximado asociado al intervalo  $y \pm U$ , e indicar cómo se ha determinado;
- proporcionar la información que se describe en el informe, o hacer referencia a algún documento que la incluya.

Cuando la incertidumbre de medida viene dada por  $U$ , es preferible, indicar el resultado numérico de la medición como en el siguiente ejemplo. Considerar que

las informaciones entre paréntesis pueden omitirse para mayor concisión, siempre que  $U$ ,  $u_c$  y  $k$  aparezcan definidas en el documento que expresa el resultado.

“ $m_S = (100,021\,47 \pm 0,000\,79)$  g, donde el número que sigue al símbolo  $\pm$  es el valor numérico de  $U = k u_c$  (incertidumbre expandida), con  $U$  determinada a partir de  $u_c = 0,35$  mg (incertidumbre típica combinada), y de  $k = 2,26$  (factor de cobertura), basado en la distribución  $t$  de Student para  $\nu = 9$  grados de libertad, definiendo un intervalo estimado para tener un nivel de confianza del 95 por ciento”.

Los valores numéricos de la estimación de  $y$  y de su incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$  o de su incertidumbre expandida  $U$  **no deben darse con un número excesivo de cifras**. Habitualmente basta con dar  $u_c(y)$  y  $U$  [así como las incertidumbres típicas  $u(x_i)$  de las estimaciones de entrada  $x_i$ ] **con dos cifras significativas**, aunque en ciertos casos, pueda ser necesario mantener cifras suplementarias para evitar la propagación de errores de redondeo en cálculos posteriores.

A la hora de dar los resultados finales, puede ser adecuado redondear las incertidumbres por exceso, **mejor que a la cifra más próxima**. Por ejemplo  $u_c(y) = 10,47\text{ m}\Omega$  podría redondearse a  $11\text{ m}\Omega$ . No obstante, deberá prevalecer el sentido común, y un valor tal como  $u(x_i) = 28,05\text{ kHz}$  deberá redondearse al valor inferior  $28\text{ kHz}$ . **Las estimaciones de entrada y de salida deben redondearse de acuerdo con sus incertidumbres**; por ejemplo, si  $y = 10,057\,62\,\Omega$ , con  $u_c(y) = 27\text{ m}\Omega$ , y deberá redondearse a  $10,058\,\Omega$ . Los coeficientes de correlación deberán darse con tres cifras significativas, cuando sus valores absolutos sean próximos a la unidad.

En el informe detallado que describe el modo de obtención del resultado de una medición y de su incertidumbre, deben seguirse las recomendaciones dadas en 0 y, en consecuencia:

a) dar el valor de cada estimación de entrada  $x_i$  y de su incertidumbre típica  $u(x_i)$ , junto con una descripción de cómo han sido obtenidas;

- b) dar las covarianzas estimadas, o los coeficientes de correlación estimados (preferiblemente ambas cosas), asociados a todas las estimaciones de entrada que están correlacionadas, así como los métodos utilizados para su obtención;
- c) dar los grados de libertad de la incertidumbre típica de cada estimación de entrada, y su forma de obtención;
- d) indicar la función  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$  y, cuando se juzgue útil, las derivadas parciales o coeficientes de sensibilidad  $\partial f / \partial x_i$ . Si alguno de estos coeficientes ha sido obtenido experimentalmente, debe incluirse también su proceso de obtención.

# CAPÍTULO 4

## 4.1 RESULTADOS

Se realiza el estudio de repetibilidad y reproducibilidad corto (estudio R&R corto) con la finalidad de validar el método de medición denominado Capacidad de 20 h, teniendo en consideración que este estudio se realiza para analizar el sistema de medición, más no una evaluación del proceso productivo tal como lo sostiene la norma ISO/IEC 17025 Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración, la misma que menciona en la introducción que “este documento se ha desarrollado con el objetivo de promover la confianza en la operación de los laboratorios y que este documento contiene requisitos que permiten a los laboratorios demostrar que operan de forma competente y que tienen la capacidad de generar resultados válidos”.

Para este estudio se escogieron 5 baterías con 2 réplicas de un mismo lote en las cuales se evaluó el ensayo de Capacidad de 20 h por 3 analistas. Es importante mencionar que debido a la naturaleza de las muestras, las baterías después de ser descargadas se someten a una carga para luego repetir el ensayo por el siguiente analista, por ello se hace uso de la herramienta R&R cruzado, la misma que es específica en el caso en que los analistas no pueden medir todas las partes.

**Tabla 5. Diseño para estudio R&R**

Muestra	Analista	Resultado C20 corregido (Ah)
1	1	R1
2	1	R2
3	1	R3
4	1	R4

5	1	R5
1	1	R6
2	1	R7
3	1	R8
4	1	R9
5	1	R10
1	2	R11
2	2	R12
3	2	R13
4	2	R14
5	2	R15
1	2	R16
2	2	R17
3	2	R18
4	2	R19
5	2	R20
1	3	R21
2	3	R22
3	3	R23
4	3	R24
5	3	R25
1	3	R26
2	3	R27
3	3	R28
4	3	R29
5	3	R30

En los criterios generales del SAE el documento CR GA01 - Acreditación de Laboratorios de Ensayo y Calibración según NTE INEN-ISO/IEC 17025:2018 menciona que “El laboratorio debe ejecutar una validación con un número de datos que sean estadísticamente válidos considerando mínimo tres niveles en el rango del alcance de acreditación solicitado, excepto los rangos que por su rango estrecho de aplicación no lo permita” de acuerdo a este enunciado la validación se llevó a cabo en 3 niveles en el rango del alcance solicitado: nivel bajo, nivel medio y nivel alto de la capacidad nominal expresada en amperios-hora (Ah) para asegurar todo el rango de medición. Los siguientes 3 niveles de capacidad nominal corresponden al nivel mínimo, nivel medio y nivel máximo del catálogo de baterías:

**Tabla 6. Niveles de capacidad nominal**

<b>Nivel</b>	<b>Capacidad nominal (Ah)</b>
N <sub>1</sub>	32
N <sub>2</sub>	79
N <sub>3</sub>	205

En las siguientes tablas se muestran los resultados de corriente y tiempo obtenidos para cada nivel. Estos resultados fueron corregidos haciendo uso de los certificados de calibración del módulo de ciclos de vida usado durante la ejecución de este ensayo en las magnitudes de intensidad y tiempo, esto con la finalidad de asegurar la cadena de trazabilidad al SI.

**Tabla 7. Datos del nivel 1: 32 Ah**

**Nivel 1    32    Ah**

No.	Analista	Línea	In (A)	Error (A)	In corregido (A)	t (h)	Error (h)	t corregido (h)	C20 (Ah)	C20 corregido (Ah)
1	<b>1</b>	11 V	1.6	-0.01	1.61	21.629	0.01	21.62	34.61	34.81
2		12 V	1.6	-0.01	1.61	20.057	0.01	20.05	32.09	32.28
3		13 V	1.6	0.02	1.58	21.121	0.01	21.11	33.79	33.36
4		14 V	1.6	-0.02	1.62	20.725	0.01	20.71	33.16	33.56
5		15 V	1.6	-0.03	1.63	20.779	0.01	20.77	33.25	33.85
6	<b>1</b>	16 V	1.6	0.05	1.55	22.403	0.01	22.39	35.85	34.71
7		17 V	1.6	0.04	1.56	20.661	0.01	20.65	33.06	32.26
8		18 V	1.6	0.03	1.57	21.197	0.01	21.19	33.91	33.34
9		19 V	1.6	0.03	1.57	21.365	0.01	21.35	34.18	33.50
10		20 V	1.6	-0.06	1.66	20.396	0.01	20.39	32.63	33.79
11	<b>2</b>	11 V	1.6	-0.01	1.61	21.573	0.01	21.56	34.52	34.72
12		12 V	1.6	-0.01	1.61	20.118	0.01	20.11	32.19	32.37
13		13 V	1.6	0.02	1.58	21.062	0.01	21.05	33.70	33.26
14		14 V	1.6	-0.02	1.62	20.710	0.01	20.70	33.14	33.53
15		15 V	1.6	-0.03	1.63	20.746	0.01	20.74	33.19	33.80
16	<b>2</b>	16 V	1.6	0.05	1.55	22.491	0.01	22.48	35.98	34.85
17		17 V	1.6	0.04	1.56	20.683	0.01	20.67	33.09	32.29
18		18 V	1.6	0.03	1.57	21.166	0.01	21.16	33.87	33.29
19		19 V	1.6	0.03	1.57	21.432	0.01	21.42	34.29	33.61
20		20 V	1.6	-0.06	1.66	20.400	0.01	20.39	32.64	33.80
21	<b>3</b>	11 V	1.6	-0.01	1.61	21.652	0.01	21.64	34.64	34.84
22		12 V	1.6	-0.01	1.61	20.129	0.01	20.12	32.21	32.39
23		13 V	1.6	0.02	1.58	21.105	0.01	21.10	33.77	33.33
24		14 V	1.6	-0.02	1.62	20.829	0.01	20.82	33.33	33.73
25		15 V	1.6	-0.03	1.63	20.609	0.01	20.60	32.97	33.58
26	<b>3</b>	16 V	1.6	0.05	1.55	22.386	0.01	22.38	35.82	34.68
27		17 V	1.6	0.04	1.56	20.746	0.01	20.74	33.19	32.39
28		18 V	1.6	0.03	1.57	21.252	0.01	21.24	34.00	33.42
29		19 V	1.6	0.03	1.57	21.427	0.01	21.42	34.28	33.60
30		20 V	1.6	-0.06	1.66	20.363	0.01	20.35	32.58	33.74

**Tabla 8. Datos del nivel 2: 79 Ah**

**Nivel 2 79 Ah**

No.	Analista	Línea	In (A)	Error (A)	In corregido (A)	t (h)	Error (h)	t corregido (h)	C20 (Ah)	C20 corregido (Ah)
1	1	1 N	3.95	-0.02	3.97	21.115	0.00	21.115	83.40	83.77
2		2 N	3.95	0.03	3.92	21.027	0.00	21.027	83.05	82.37
3		3 N	3.95	-0.02	3.97	21.419	0.00	21.419	84.60	85.01
4		4 N	3.95	0.03	3.92	21.539	0.00	21.539	85.08	84.43
5		5 N	3.95	0.01	3.94	21.236	0.00	21.236	83.88	83.59
6	1	6 N	3.95	0.00	3.95	21.210	0.00	21.210	83.78	83.68
7		7 N	3.95	0.04	3.91	21.012	0.00	21.012	83.00	82.22
8		8 N	3.95	-0.01	3.96	21.445	0.00	21.445	84.71	84.89
9		9 N	3.95	0.03	3.92	21.563	0.00	21.563	85.17	84.47
10		10 N	3.95	-0.02	3.97	21.055	0.00	21.055	83.17	83.59
11	2	1 N	3.95	-0.02	3.97	21.100	0.00	21.100	83.34	83.72
12		2 N	3.95	0.03	3.92	21.011	0.00	21.011	82.99	82.30
13		3 N	3.95	-0.02	3.97	21.342	0.00	21.342	84.30	84.71
14		4 N	3.95	0.03	3.92	21.533	0.00	21.533	85.06	84.41
15		5 N	3.95	0.01	3.94	21.250	0.00	21.250	83.94	83.64
16	2	6 N	3.95	0.00	3.95	21.226	0.00	21.226	83.84	83.74
17		7 N	3.95	0.04	3.91	21.019	0.00	21.019	83.02	82.25
18		8 N	3.95	-0.01	3.96	21.408	0.00	21.408	84.56	84.74
19		9 N	3.95	0.03	3.92	21.584	0.00	21.584	85.25	84.55
20		10 N	3.95	-0.02	3.97	21.041	0.00	21.041	83.11	83.54
21	3	1 N	3.95	-0.02	3.97	21.085	0.00	21.085	83.28	83.66
22		2 N	3.95	0.03	3.92	20.985	0.00	20.985	82.89	82.20
23		3 N	3.95	-0.02	3.97	21.408	0.00	21.408	84.56	84.97
24		4 N	3.95	0.03	3.92	21.587	0.00	21.587	85.27	84.62
25		5 N	3.95	0.01	3.94	21.236	0.00	21.236	83.88	83.59
26	3	6 N	3.95	0.00	3.95	21.238	0.00	21.238	83.89	83.78
27		7 N	3.95	0.04	3.91	21.009	0.00	21.009	82.99	82.21
28		8 N	3.95	-0.01	3.96	21.457	0.00	21.457	84.75	84.94
29		9 N	3.95	0.03	3.92	21.574	0.00	21.574	85.22	84.52
30		10 N	3.95	-0.02	3.97	21.032	0.00	21.032	83.07	83.50

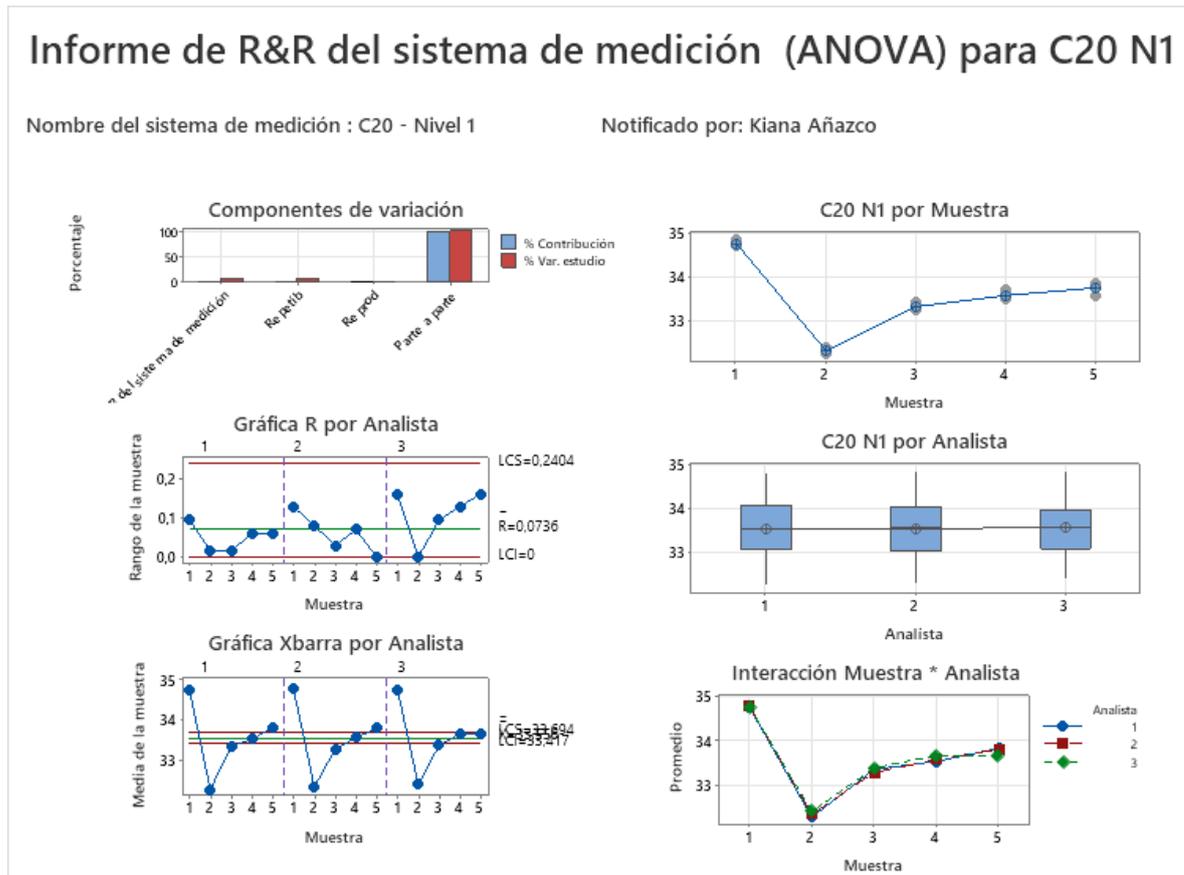
**Tabla 9. Datos del nivel 3: 205 Ah**

**Nivel 3 205 Ah**

No.	Analista	Línea	In (A)	Error (A)	In corregido (A)	t (h)	Error (h)	t corregido (h)	C20 (Ah)	C20 corregido (Ah)
1	1	17 V	10.25	0.04	10.21	19.743	0.01	19.73	202.36	201.48
2		18 V	10.25	-0.04	10.29	20.986	0.01	20.98	215.10	215.78
3		19 V	10.25	-0.04	10.29	20.954	0.01	20.94	214.78	215.61
4		20 V	10.25	-0.07	10.32	20.690	0.01	20.68	212.07	213.41
5		21 V	10.25	0.06	10.19	20.206	0.01	20.20	207.12	205.79
6	1	17 V	10.25	0.04	10.21	19.760	0.01	19.75	202.54	201.65
7		18 V	10.25	-0.04	10.29	20.835	0.01	20.83	213.56	214.24
8		19 V	10.25	-0.04	10.29	20.975	0.01	20.96	214.99	215.83
9		20 V	10.25	-0.07	10.32	20.817	0.01	20.81	213.37	214.73
10		21 V	10.25	0.06	10.19	20.235	0.01	20.23	207.41	206.08
11	2	17 V	10.25	0.04	10.21	19.765	0.01	19.76	202.59	201.70
12		18 V	10.25	-0.04	10.29	20.748	0.01	20.74	212.67	213.34
13		19 V	10.25	-0.04	10.29	20.934	0.01	20.92	214.57	215.41
14		20 V	10.25	-0.07	10.32	20.828	0.01	20.82	213.48	214.84
15		21 V	10.25	0.06	10.19	20.261	0.01	20.25	207.68	206.35
16	2	17 V	10.25	0.04	10.21	19.779	0.01	19.77	202.74	201.85
17		18 V	10.25	-0.04	10.29	20.971	0.01	20.96	214.95	215.63
18		19 V	10.25	-0.04	10.29	20.904	0.01	20.89	214.27	215.10
19		20 V	10.25	-0.07	10.32	20.779	0.01	20.77	212.99	214.34
20		21 V	10.25	0.06	10.19	20.261	0.01	20.25	207.68	206.35
21	3	17 V	10.25	0.04	10.21	19.760	0.01	19.75	202.54	201.65
22		18 V	10.25	-0.04	10.29	20.835	0.01	20.83	213.56	214.24
23		19 V	10.25	-0.04	10.29	20.975	0.01	20.96	214.99	215.83
24		20 V	10.25	-0.07	10.32	20.691	0.01	20.68	212.08	213.42
25		21 V	10.25	0.06	10.19	20.235	0.01	20.23	207.41	206.08
26	3	17 V	10.25	-0.04	10.29	19.522	0.01	19.51	200.10	200.78
27		18 V	10.25	-0.04	10.29	20.990	0.01	20.98	215.15	215.88
28		19 V	10.25	0.07	10.18	21.214	0.01	21.20	217.44	215.86
29		20 V	10.25	-0.07	10.32	20.798	0.01	20.79	213.18	214.53
30		21 V	10.25	0.06	10.19	20.266	0.01	20.26	207.73	206.41

Los resultados del estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) realizados en el software Minitab se muestran a continuación:

**Figura 2 Informe de R&R para nivel 1: 32 Ah**



A continuación se describen las gráficas del estudio R&R del sistema de medición:

**Gráfica Componentes de variación**

En la gráfica podemos ver que el componente de variación más grande es la variación entre las partes, por lo tanto se concluye que el sistema de medición es aceptable.

### Gráfica R por Analista

Se puede observar que los analistas miden consistentemente, ya que los puntos de las muestras están dentro de los límites de control. El rango de la muestra se encuentra entre 0 y 0.2.

### Gráfica Xbarra por Analista

En la gráfica podemos observar que la mayoría de los puntos están más allá de los límites de control. Se observa mayor variación entre los promedios de las partes, lo que indica que la variación de parte a parte es mucho más grande que la variación del equipo de medición.

### Gráfica Mediciones por muestra

En la gráfica se muestra que las mediciones de cada parte realizadas por cada analista están cercanas entre sí. Esto quiere decir que existe poca variación entre las mediciones de la misma parte.

### Gráfica Mediciones por Analista

Se observa que las diferencias entre los analistas son pequeñas en comparación con las diferencias entre las partes. La línea horizontal indica que las medias de las mediciones de cada analista son similares.

### Gráfica de interacción Muestra\*Analista

Se observa que las líneas son coincidentes, esto significa que los analistas miden de manera similar.

**Tabla 10. Tabla ANOVA de dos factores con interacción**

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Muestra	4	18,3620	4,59049	494,624	0,000
Analista	2	0,0034	0,00171	0,185	0,835
Muestra * Analista	8	0,0742	0,00928	2,251	0,084
Repetibilidad	15	0,0618	0,00412		
Total	29	18,5015			

$\alpha$  para eliminar el término de interacción = 0,05

El estadístico F (Muestra \* Analista) cuyo resultado se obtiene al dividir

$$\frac{MC_{muestra \times Analista}}{MC_{Repetibilidad}} = \frac{0.0093}{0.0041} = 2.25. \text{ Se concluye que la interacción muestra x analista}$$

no contribuye de manera significativa al error de medición dado su p-valor = 0.084 > 0.05. Como el valor p de la interacción de muestra y analista es mayor que 0.05, Minitab elimina la interacción debido a que no es significativa y por lo tanto genera una segunda tabla ANOVA sin la interacción. A continuación de muestra la tabla:

**Tabla 11. Tabla ANOVA dos factores sin interacción**

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Muestra	4	18,3620	4,59049	775,890	0,000
Analista	2	0,0034	0,00171	0,290	0,751
Repetibilidad	23	0,1361	0,00592		
Total	29	18,5015			

**Tabla 12. Componentes de la varianza**

Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0,005916	0,77
Repetibilidad	0,005916	0,77
Reproducibilidad	0,000000	0,00
Analista	0,000000	0,00
Parte a parte	0,764096	99,23
Variación total	0,770013	100,00

El %Contribución para la variación entre las partes es 99.23%. Minitab divide el valor del componente de la varianza entre las partes, aproximadamente 0.764, entre la variación total, aproximadamente 0.770, y multiplica el resultado por 100%. Como el %Contribución de la variación entre las partes es alto, el sistema de medición puede distinguir entre las partes de manera fiable.

**Tabla 13. Evaluación del sistema de medición**

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var. (%VE)
Gage R&R total	0,076918	0,46151	8,77
Repetibilidad	0,076918	0,46151	8,77
Reproducibilidad	0,000000	0,000000	0,00
Analista	0,000000	0,000000	0,00
Parte a parte	0,874126	5,24476	99,62
Variación total	0,877504	5,26502	100,00

Se utiliza la variación porcentual del estudio (%Var. del estudio) para comparar la variación del sistema de medición con la variación total. El %Var. del estudio hace uso de la variación del proceso, que se define como 6 veces la desviación estándar del proceso.

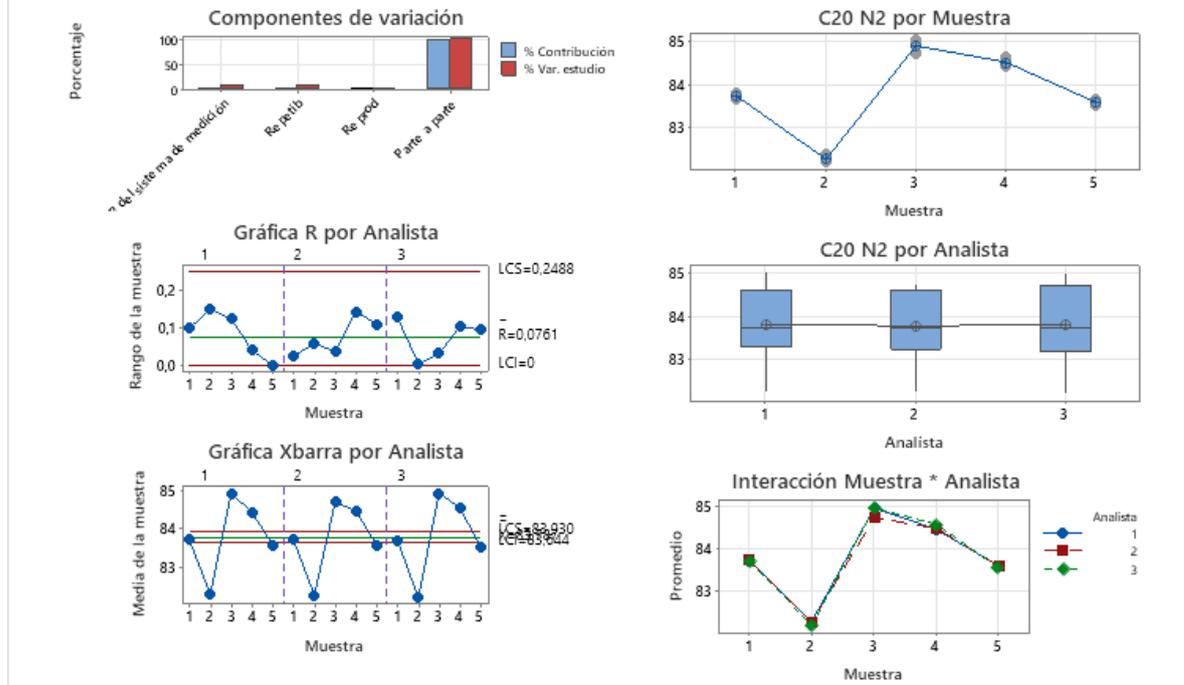
De acuerdo con las directrices de AIAG, la variación del sistema de medición es 8.77% inferior al 10% de la variación del proceso, por lo tanto el sistema de medición es aceptable.

**Figura 3** Informe de R&R para nivel 2: 79 Ah

# Informe de R&R del sistema de medición (ANOVA) para C20 N2

Nombre del sistema de medición : C20 - Nivel 2

Notificado por: Kiana Añazco



A continuación se describen las gráficas del estudio R&R del sistema de medición:

## Gráfica Componentes de variación

En la gráfica podemos ver que el componente de variación más grande es la variación Parte a parte, lo que significa que el sistema de medición es aceptable.

## Gráfica R por Analista

Se puede observar que los analistas miden consistentemente porque los puntos de las muestras están dentro de los límites de control. En la gráfica se observa que el rango de la muestra se encuentra entre 0 y 0.2.

## Gráfica Xbarra por Analista

En la gráfica podemos observar que la mayoría de los puntos de la muestra están más allá de los límites de control. Existe mayor variación entre los promedios de las

partes, lo que indica que la variación de parte a parte es mucho más grande que la variación del equipo de medición.

### Gráfica Mediciones por muestra

En la gráfica se muestra que las mediciones de cada parte realizadas por cada analista están cercanas entre sí. Esto quiere decir que existe poca variación entre las mediciones de la misma parte.

### Gráfica Mediciones por Analista

Se observa que las diferencias entre los analistas son pequeñas en comparación con las diferencias entre las partes ya que la línea horizontal nos indica que las medias de las mediciones de cada analista son similares.

### Gráfica de interacción Muestra\*Analista

Se observa que las líneas son coincidentes, esto significa que los analistas miden de manera similar.

**Tabla 14. Tabla ANOVA de dos factores con interacción**

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Muestra	4	24,5301	6,13253	583,777	0,000
Analista	2	0,0110	0,00550	0,524	0,611
Muestra * Analista	8	0,0840	0,01050	2,558	0,056
Repetibilidad	15	0,0616	0,00411		
Total	29	24,6868			

$\alpha$  para eliminar el término de interacción = 0,05

El estadístico F (Muestra \* Analista) cuyo resultado se obtiene al dividir

$$\frac{MC_{muestra \times Analista}}{MC_{Repetibilidad}} = \frac{0.01050}{0.00411} = 2.558. \text{ Se concluye que la interacción muestra x}$$

analista no contribuye de manera significativa al error de medición dado su p-valor = 0.056 > 0.05. Como el valor p de la interacción de muestra y analista es mayor que 0.05, Minitab elimina la interacción debido a que no es significativa y por lo tanto genera una segunda tabla ANOVA sin la interacción. A continuación de muestra la tabla:

**Tabla 15. Tabla ANOVA dos factores sin interacción**

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Muestra	4	24,5301	6,13253	968,458	0,000
Analista	2	0,0110	0,00550	0,869	0,433
Repetibilidad	23	0,1456	0,00633		
Total	29	24,6868			

**Tabla 16. Componentes de la varianza**

Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0,00633	0,62
Repetibilidad	0,00633	0,62
Reproducibilidad	0,00000	0,00
Analista	0,00000	0,00
Parte a parte	1,02103	99,38
Variación total	1,02737	100,00

El %Contribución para la variación entre las partes es 99.38%. Minitab divide el valor del componente de la varianza entre las partes, aproximadamente 1.02103, entre la variación total, aproximadamente 1.02737, y multiplica el resultado por 100%. Como el %Contribución de la variación entre las partes es alto, el sistema de medición puede distinguir entre las partes de manera fiable.

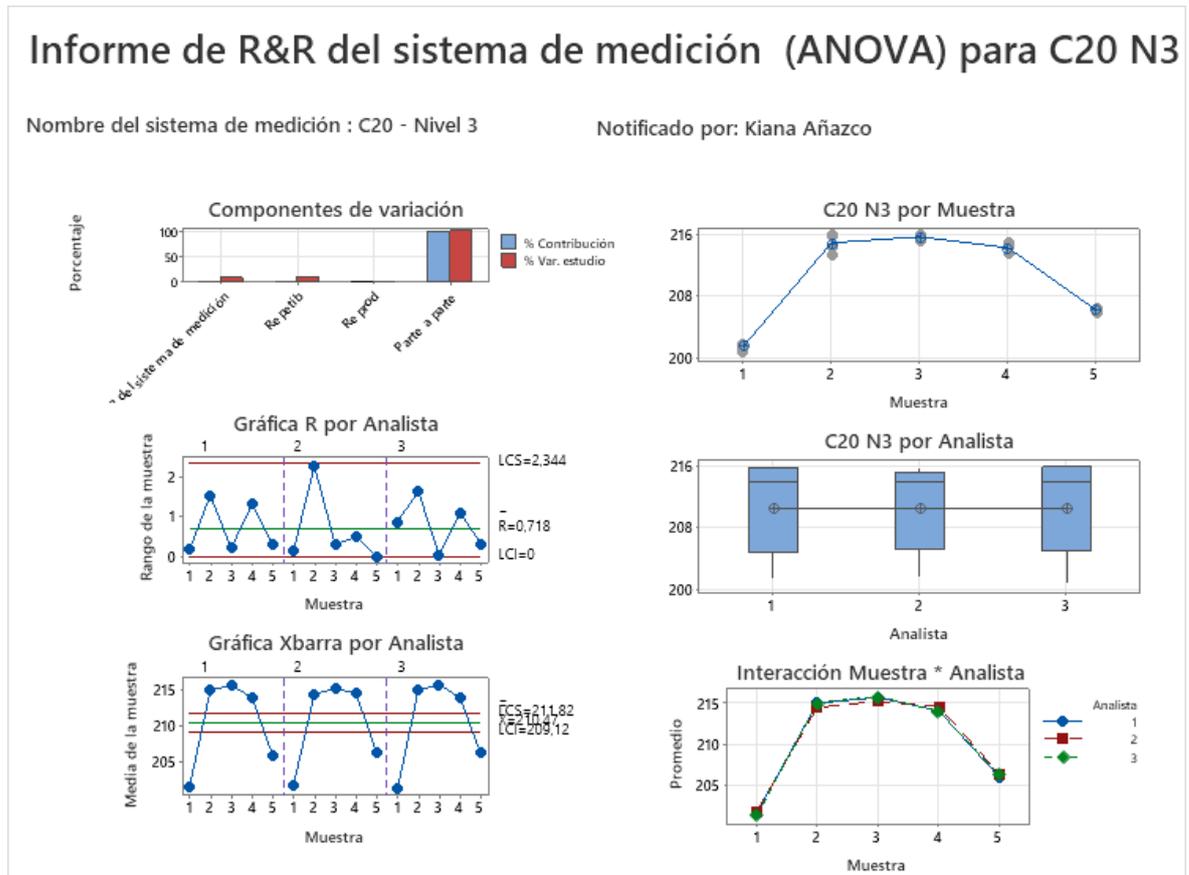
**Tabla 17. Evaluación del sistema de medición**

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var. (%VE)
Gage R&R total	0,07958	0,47745	7,85
Repetibilidad	0,07958	0,47745	7,85
Reproducibilidad	0,00000	0,00000	0,00
Analista	0,00000	0,00000	0,00
Parte a parte	1,01046	6,06277	99,69
Variación total	1,01359	6,08154	100,00

Número de categorías distintas = 17

De acuerdo con las directrices de AIAG, la variación del sistema de medición es 7.85% inferior al 10% de la variación del proceso, por lo tanto el sistema de medición es aceptable.

**Figura 4 Informe de R&R para nivel 3: 205 Ah**



A continuación de describen las gráficas del estudio R&R del sistema de medición:

**Gráfica Componentes de variación**

En la gráfica podemos ver que el componente de variación más grande es la variación Parte a parte, lo que significa que el sistema de medición es aceptable.

**Gráfica R por Analista**

Se puede observar que los analistas miden consistentemente porque los puntos de las muestras están dentro de los límites de control. En la gráfica se observa que el rango de la muestra se encuentra entre 0 y 2.

### **Gráfica Xbarra por Analista**

En la gráfica podemos observar que todos los puntos de la muestra están más allá de los límites de control. Existe mayor variación entre los promedios de las partes, lo que indica que la variación de parte a parte es mucho más grande que la variación del equipo de medición.

### **Gráfica Mediciones por muestra**

La gráfica muestra que las mediciones de cada parte realizadas por cada analista están cercanas entre sí. Esto quiere decir que existe poca variación entre las mediciones de la misma parte.

### **Gráfica Mediciones por Analista**

Se observa que las diferencias entre los analistas son pequeñas en comparación con las diferencias entre las partes ya que la línea horizontal nos indica que las medias de las mediciones de cada analista son similares.

### **Gráfica de interacción Muestra\*Analista**

Se observa que las líneas son coincidentes, esto significa que los analistas miden de manera similar.

**Tabla 18. Tabla ANOVA de dos factores con interacción**

<u>Fuente</u>	<u>GL</u>	<u>SC</u>	<u>MC</u>	<u>F</u>	<u>P</u>
Muestra	4	948,770	237,193	1101,72	0,000
Analista	2	0,005	0,003	0,01	0,988
Muestra * Analista	8	1,722	0,215	0,44	0,878
Repetibilidad	15	7,334	0,489		
Total	29	957,832			

*α para eliminar el término de interacción = 0,05*

El estadístico F (Muestra \* Analista) cuyo resultado se obtiene al dividir

$$\frac{MC_{muestra \times Analista}}{MC_{Repetibilidad}} = \frac{0,215}{0,489} = 0,44. \text{ Se concluye que la interacción muestra x analista}$$

no contribuye de manera significativa al error de medición dado su p-valor = 0.878 > 0.05. Como el valor p de la interacción de muestra y analista es mayor que 0.05, Minitab elimina la interacción debido a que no es significativa y por lo tanto genera una segunda tabla ANOVA sin la interacción. A continuación de muestra la tabla:

**Tabla 19. Tabla ANOVA dos factores sin interacción**

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Muestra	4	948,770	237,193	602,383	0,000
Analista	2	0,005	0,003	0,006	0,994
Repetibilidad	23	9,056	0,394		
Total	29	957,832			

**Tabla 20. Componentes de la varianza**

Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0,3938	0,99
Repetibilidad	0,3938	0,99
Reproducibilidad	0,0000	0,00
Analista	0,0000	0,00
Parte a parte	39,4665	99,01
Variación total	39,8602	100,00

El %Contribución para la variación entre las partes es 99.01%. Minitab divide el valor del componente de la varianza entre las partes, aproximadamente 39.467, entre la variación total, aproximadamente 39.860, y multiplica el resultado por 100%. Como el % Contribución de la variación entre las partes es alto, el sistema de medición puede distinguir entre las partes de manera fiable.

**Tabla 21. Evaluación del sistema de medición**

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var. estudio (%VE)
Gage R&R total	0,62750	3,7650	9,94
Repetibilidad	0,62750	3,7650	9,94
Reproducibilidad	0,00000	0,0000	0,00
Analista	0,00000	0,0000	0,00
Parte a parte	6,28223	37,6934	99,50
Variación total	6,31349	37,8810	100,00

De acuerdo con las directrices de AIAG, la variación del sistema de medición es 9.94%, inferior al 10% de la variación del proceso, por lo tanto el sistema de medición es aceptable.

## 4.2 Procedimiento para el cálculo de la incertidumbre

El procedimiento para la estimación de la incertidumbre se detalla a continuación:

**Ensayo:** Capacidad de 20 h.

**Resultado:** Incertidumbre de Capacidad de 20 h expresada en amperios.

**Descripción:** El ensayo de Capacidad de 20 h es medido en una batería automotriz de 12 V mediante un módulo de ciclo de vida.

### 4.2.1 Modelo del sistema de medida

La capacidad efectiva de 20 h  $C_e$  se calcula de la siguiente forma:

$$C_e = \frac{C_n}{20 h} \times t \quad (35)$$

$$C_e = I_n \times t \quad (36)$$

En donde:

$C_e$ : es la capacidad efectiva de 20 h

$I_n$ : es la corriente nominal de descarga

$t$ : es el tiempo de descarga en horas

Entonces, para la capacidad efectiva de 20 h tenemos una función con dos magnitudes de influencia:

$$C_e = f(I_n, t) \quad (37)$$

Las magnitudes de influencia son: Corriente y tiempo.

#### 4.3. Fuentes de Incertidumbre

De acuerdo a las magnitudes de influencia antes definidas, a continuación, se enlistan las fuentes de incertidumbre asociadas a este método de ensayo:

**Tabla 22. Fuentes de incertidumbre**

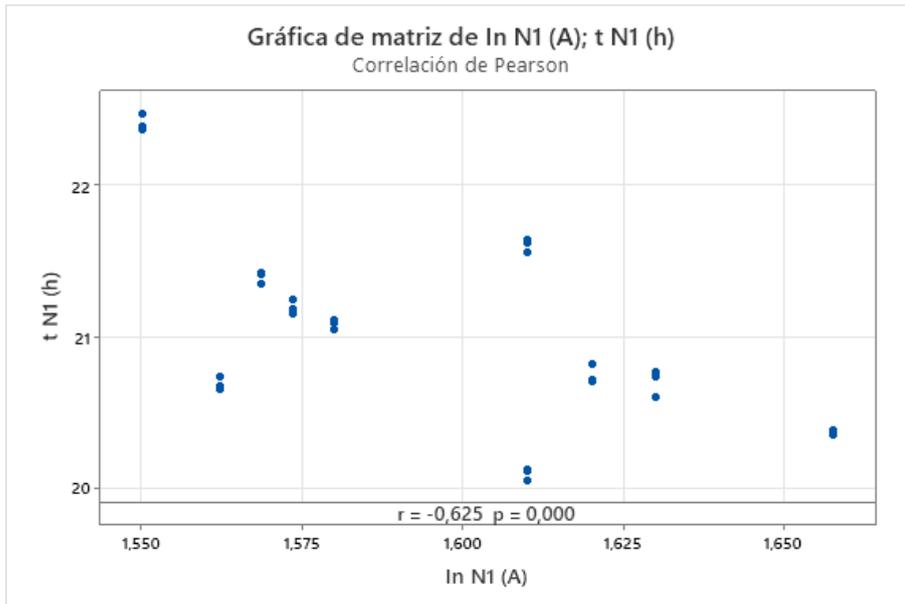
Módulo de Ciclos de Vida (Corriente)	Resolución	B - Rectangular
	Incertidumbre de equipo (Certificado)	B - Normal
	Deriva	B - Rectangular
	Repetibilidad	A
Módulo de Ciclos de Vida (Tiempo)	Resolución	B - Rectangular
	Incertidumbre de equipo (Certificado)	B - Normal
	Deriva	B - Rectangular
	Repetibilidad	A

Este tipo de distribuciones se realizan con base en los conceptos en la metodología aplicada.

#### 4.4. Correlación de las variables de respuesta

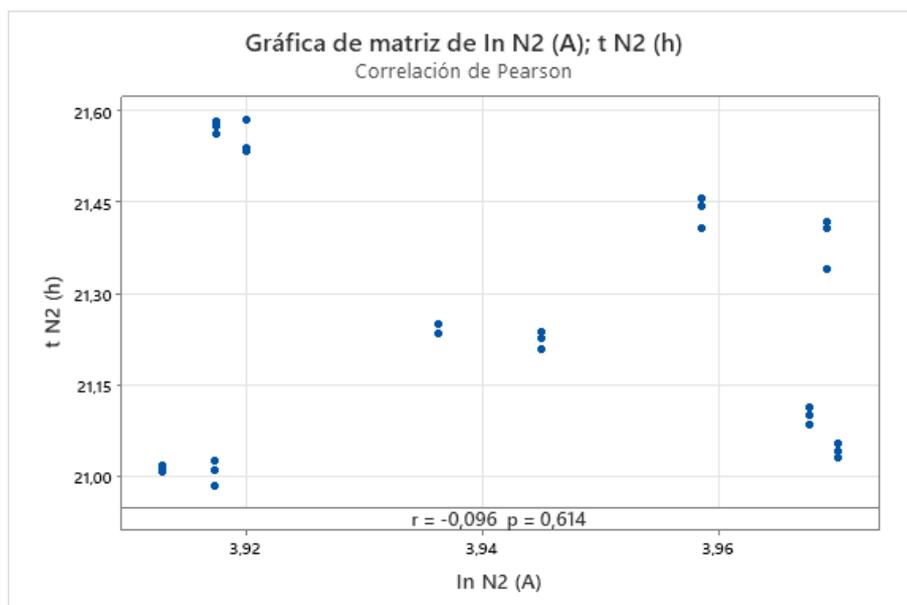
A continuación se detallan las pruebas de correlación realizadas para las variables de cada nivel:

**Figura 5. Gráfica de relación entre  $I_n$  y  $t$  - Nivel 1**



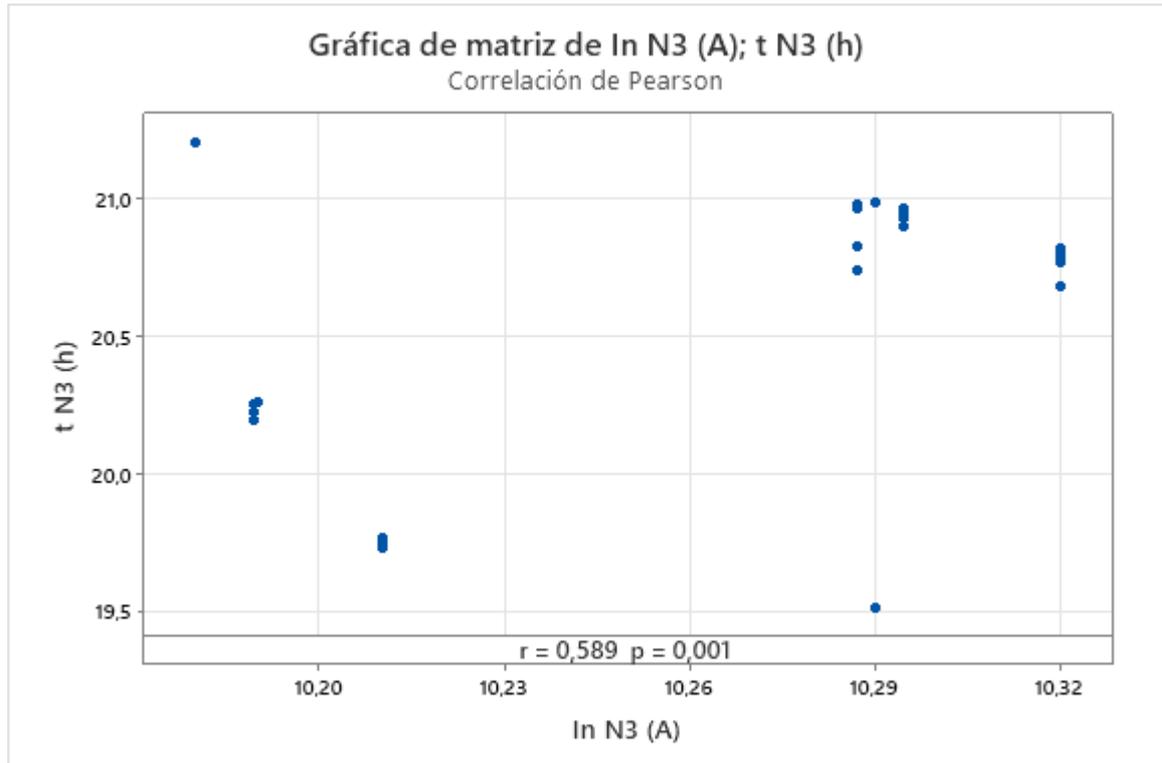
El coeficiente de correlación de Pearson entre la corriente nominal  $I_n$  y el tiempo  $t$  es  $-0.625$  y el valor  $p$  es  $0.000$ . El valor  $p$  es menor que el nivel de significancia de  $0.05$ , lo que indica que la correlación es significativa. A medida que la corriente nominal aumenta el tiempo tiende a disminuir.

**Figura 6.** Gráfica de relación entre  $I_n$  y  $t$  – Nivel 2



El coeficiente de correlación de Pearson entre la corriente nominal  $I_n$  y el tiempo  $t$  es  $-0.096$  y el valor  $p$  es  $0.614$ . El valor  $p$  es mayor que el nivel de significancia de  $0.05$ , lo que indica que no hay correlación.

**Figura 7.** Gráfica de relación entre  $I_n$  y  $t$  - Nivel 3



El coeficiente de correlación de Pearson entre la corriente nominal  $I_n$  y el tiempo  $t$  es  $0.589$  y el valor  $p$  es  $0.001$ . El valor  $p$  es menor que el nivel de significancia de  $0.05$ , lo que indica que la correlación es significativa. A medida que la corriente nominal aumenta el tiempo tiende a disminuir.

#### 4.5. Cálculo de la incertidumbre estándar de las fuentes

##### 4.5.1. Corriente

$$u_I = \sqrt{Inc. Equipo^2 + Resolución^2 + Deriva^2 + Repet^2} \quad (38)$$

$$u_I = \sqrt{u_{inc. \text{ equipo}}^2 + u_{Resolución}^2 + u_{Deriva}^2 + u_{Repet}^2} \quad (39)$$

#### 4.5.2. Tiempo

$$u_t = \sqrt{Inc. \text{ Equipo}^2 + Resolución^2 + Deriva^2 + Repetibilidad^2} \quad (40)$$

$$u_t = \sqrt{u_{inc. \text{ equipo}}^2 + u_{Resolución}^2 + u_{Deriva}^2 + u_{Repet}^2} \quad (41)$$

#### 4.6. Cálculo de los coeficientes de sensibilidad

Partiendo de la ecuación (16) de nuestro modelo matemático y aplicando la ley de la propagación de la incertidumbre para el cálculo de los coeficientes de sensibilidad tenemos la siguiente expresión:

Coficiente de sensibilidad de la corriente:

$$c_I \equiv \frac{\partial C_e}{\partial I_n} = \frac{I_n t}{\partial I_n} = t \quad (42)$$

Coficiente de sensibilidad del tiempo:

$$c_t \equiv \frac{\partial C_e}{\partial t} = \frac{I_n t}{\partial t} = I_n \quad (43)$$

$$u_c^2(C_e) = \left[ \frac{\partial C_e}{\partial I_n} \right]^2 u^2(I_n) + \left[ \frac{\partial C_e}{\partial t} \right]^2 u^2(t) \quad (44)$$

$$u_c^2(C_e) = [t u(I_n)]^2 + [I_n u(t)]^2 \quad (45)$$

## 4.7. Cálculo de la incertidumbre estándar combinada

### 4.7.1. Corriente

$$u_I = \sqrt{c_I^2 u_I^2 + c_r^2 S_r^2} \quad (46)$$

### 4.7.2. Tiempo

$$u_t = \sqrt{c_t^2 u_t^2 + c_r^2 S_r^2} \quad (47)$$

## 4.8. Cálculo de la incertidumbre expandida

La incertidumbre expandida  $U$ , se obtiene multiplicando la incertidumbre combinada por el factor de cobertura  $k$ , que corresponde a un nivel de confianza adecuado. Para este estudio se escogió un nivel de confianza del 95.45% cuyo factor de cobertura es  $k = 2$ .

$$U = k u_c(y) \quad (48)$$

$$U_{C_e} = k u_{C_e}(y) \quad (49)$$

#### **4.9. Expresión del resultado**

El resultado final del ensayo se expresará de la siguiente manera:

$$Y = y \pm U$$

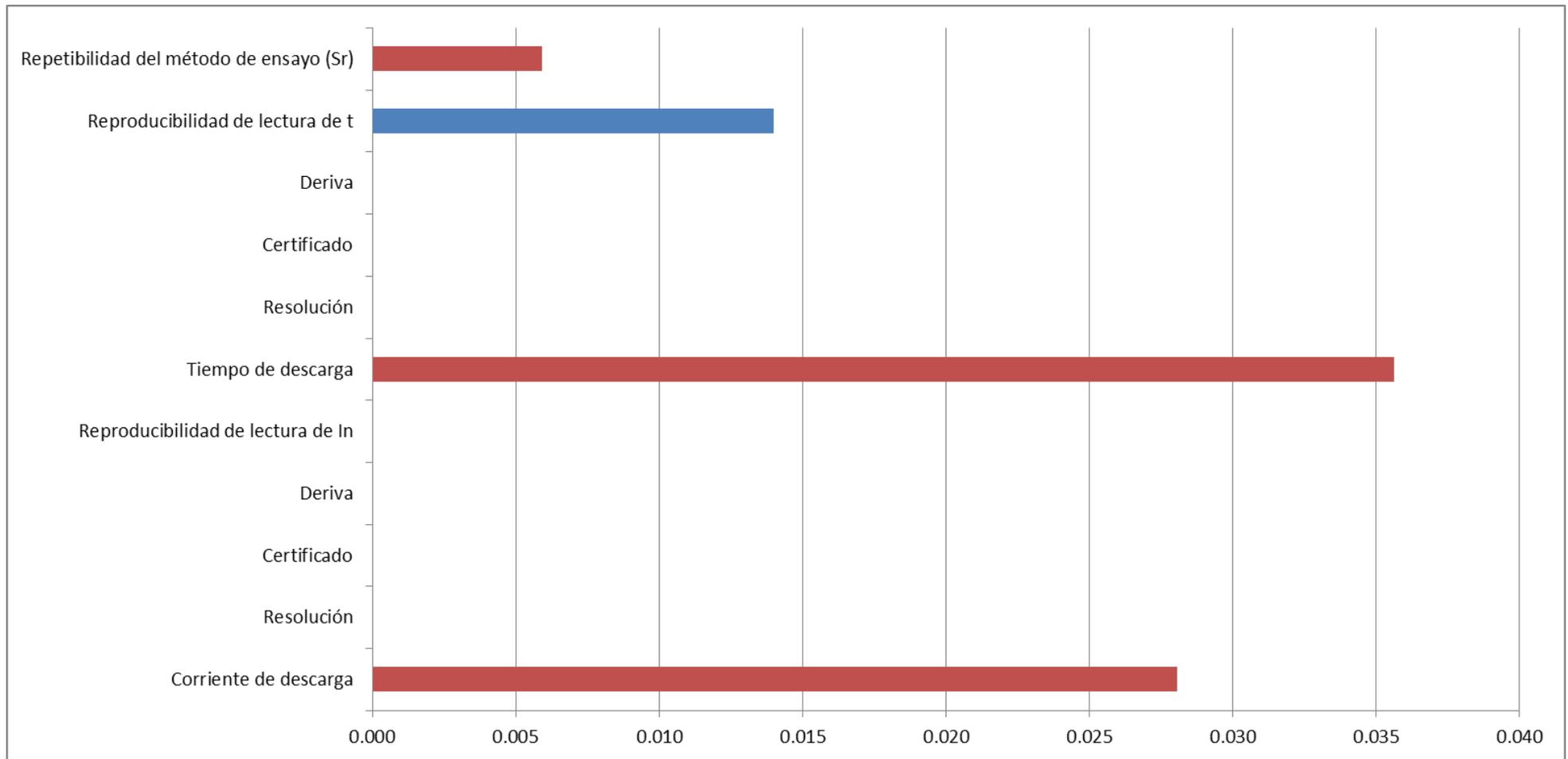
$$\text{Resultado} = C_e \pm U_{C_e}$$

#### **4.10. Resultados del Cálculo de Incertidumbre**

A continuación, se detalla en las siguientes tablas el cálculo de la incertidumbre realizado para cada nivel:



**Figura 8.** Gráfico de incertidumbre estándar combinada - Nivel: 32 Ah





**Figura 9.** Gráfico de incertidumbre estándar combinada - Nivel: 79 Ah

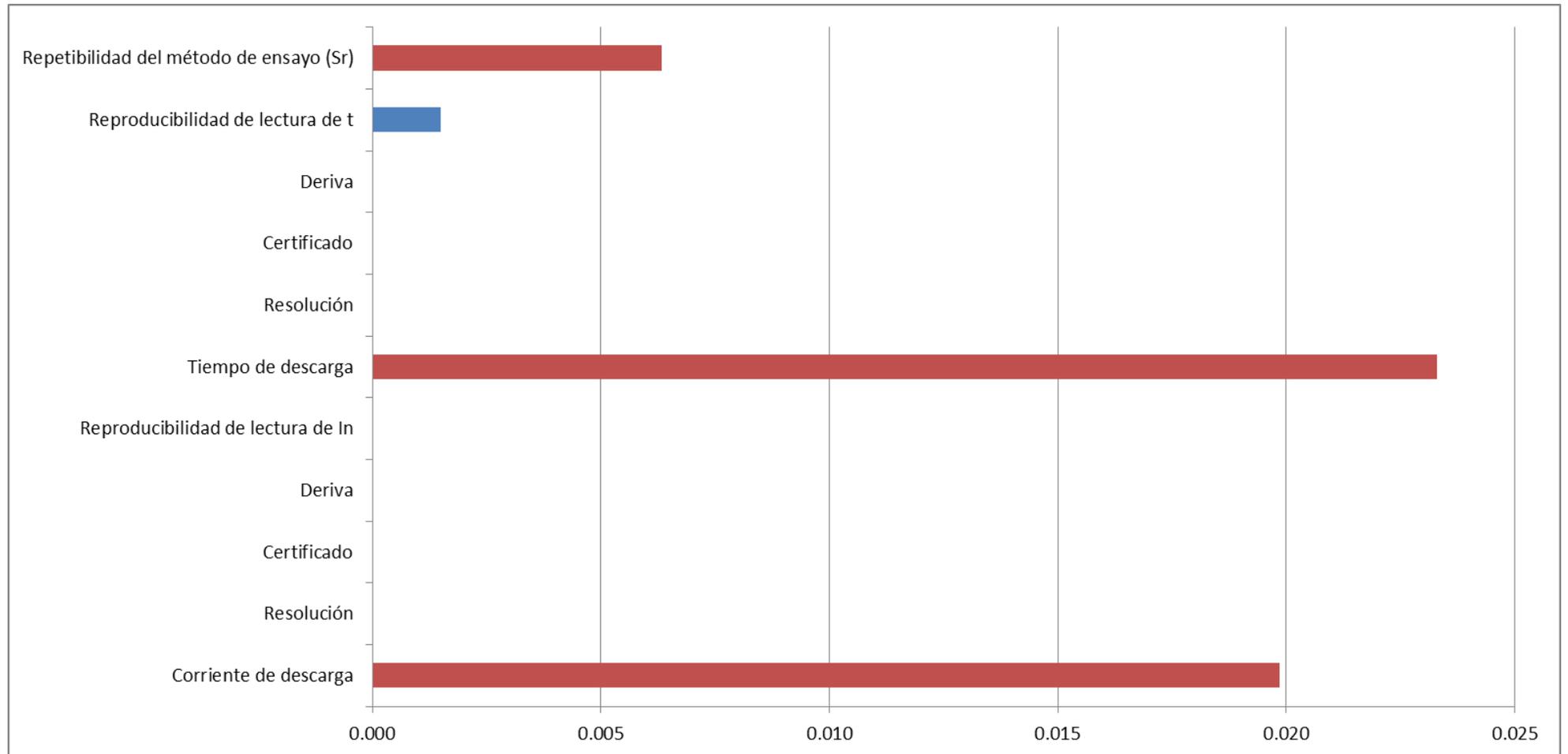


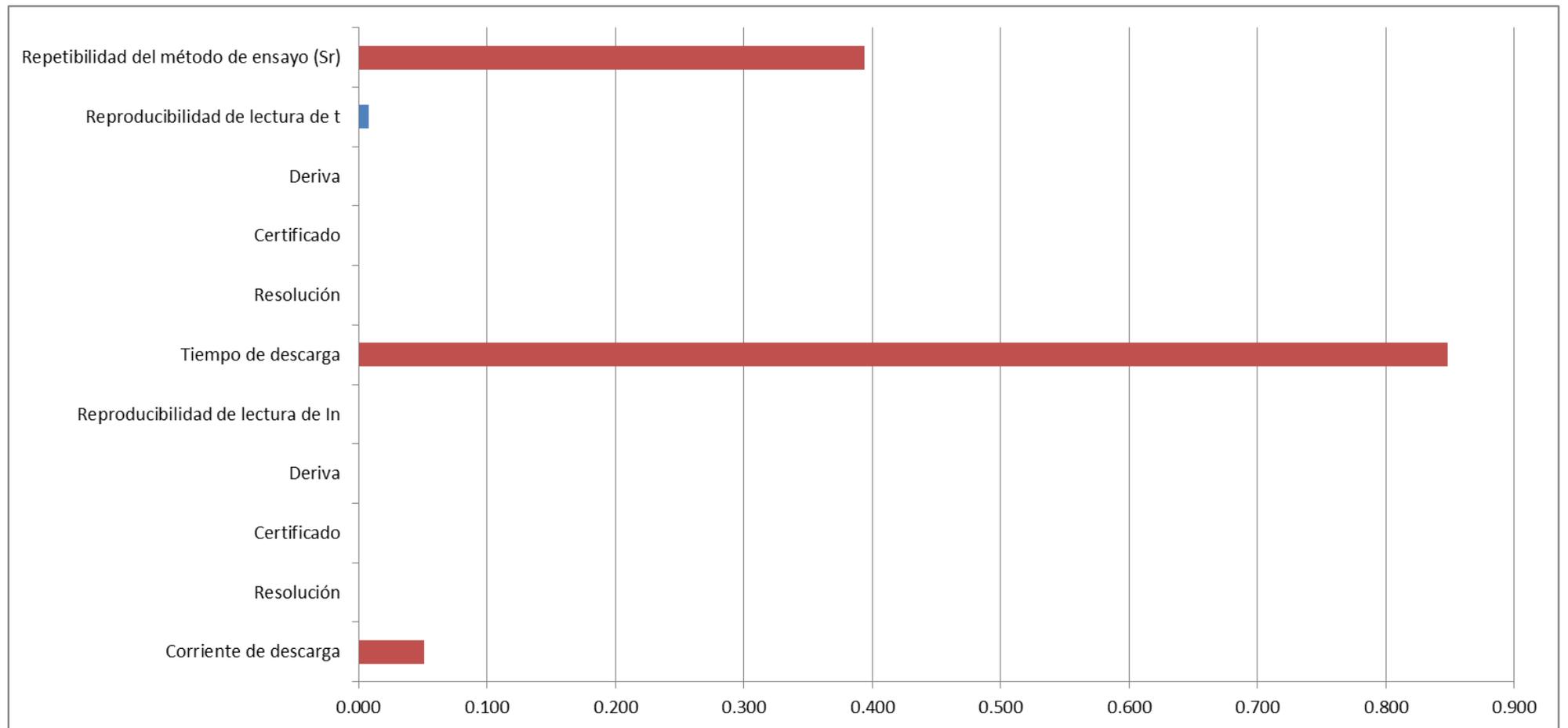
Tabla 25. Cálculo de incertidumbre – Nivel: 205 Ah

**Nivel 3**                      **205**                      **Ah**

No.	Símbolo	Magnitud de entrada (x <sub>i</sub> )	Valor estimado (x <sub>i</sub> )	Unidades	Fuente de información	Tipo de distribución	Incertidumbre estándar (u <sub>i</sub> )	c <sub>i</sub>	(c <sub>i</sub> *u <sub>i</sub> )	(c <sub>i</sub> *u <sub>i</sub> ) <sup>2</sup>
<b>1</b>	<b>In</b>	<b>Corriente de descarga</b>	<b>10.26</b>	<b>A</b>	<b>Experimental</b>		<b>0.010982872</b>	<b>20.51</b>	<b>0.225</b>	<b>0.051</b>
1.1		Resolución	0.01	A	Intrumento	B-Rectangular	0.002886751	1	0.002886751	8.3E-06
1.2		Certificado	0.0085	A	Certificado	B-Normal	0.00425	1	0.00425	1.8E-05
1.3		Deriva	0.0015		Certificados	B-Rectangular	0.000433013	1	0.000433013	1.9E-07
1.4		Repetibilidad de lectura de In	0.05312	A	Experimental	A	0.00969743	1	0.00969743	9.4E-05
<b>2</b>	<b>t</b>	<b>Tiempo de descarga</b>	<b>20.51</b>	<b>h</b>	<b>Experimental</b>		<b>0.089775274</b>	<b>10.26</b>	<b>0.921</b>	<b>0.848</b>
2.1		Resolución	2.77778E-05	h	Intrumento	B-Rectangular	8.01875E-06	1	8.01875E-06	6.4E-11
2.2		Certificado	0.000722222	h	Certificado	B-Normal	0.000361111	1	0.000361111	1.3E-07
2.3		Deriva	0.0034		Certificados	B-Rectangular	9.81E-04	1	0.000981495	9.6E-07
2.4		Repetibilidad de lectura de t	0.491686056	h	Experimental	A	0.089769181	1	0.089769181	8.1E-03
<b>3</b>		<b>Repetibilidad del método de ensayo (Sr)</b>	<b>0.628</b>	<b>A h</b>	<b>Experimental</b>		<b>0.63</b>	<b>1.00</b>	<b>0.628</b>	<b>0.394</b>
							<b>uc</b>		1.137019214	
							<b>K</b>		2	
<b>C20</b>	<b>Capacidad de 20 horas</b>		<b>210.458273</b>	<b>A h</b>		<b>±</b>	<b>U</b>		<b>2.3</b>	

<b>%U</b>	<b>1.1</b>
-----------	------------

**Figura 10.** Gráfico de incertidumbre estándar combinada - Nivel: 205 Ah



En cada una de las figuras de arriba, podemos observar el aporte de cada fuente de incertidumbre por nivel.

#### 4.10.1. Resultados obtenidos

En la siguiente tabla se presenta el resumen de los resultados obtenidos de la estimación de la incertidumbre obtenidos para cada nivel del ensayo de capacidad de 20 h:

**Tabla 26. Incertidumbre del Ensayo de Capacidad de 20 h**

Capacidad de 20 h			
Nivel	Valor medido	±	Incertidumbre
32 Ah	33.57 Ah	±	0.53 Ah
79 Ah	83.79 Ah	±	0.44 Ah
205 Ah	210.46 Ah	±	2.3 Ah

# CAPÍTULO 5

## 5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo ha servido como un referente en el que se basarán los estudios que se realicen en un futuro en la empresa dedicada a la fabricación de baterías.

### 5.1.1 Conclusiones

- El estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad R&R, realizado para la validación del método nos indica que el sistema de medición es aceptable, con resultados de 8.77% para el nivel 1, 7.85% para el nivel 2 y 9.94% para el nivel 3, los cuales se encuentran por debajo del 10% de acuerdo a la AIAG. **(Automotive Industry Action Group (AIAG), 2010)**
- Se desarrolló la metodología de acuerdo a la GUM, para determinar la incertidumbre del ensayo de Capacidad de 20 h aplicado en baterías de plomo-ácido de 12 V.
- Se ensayaron baterías de acuerdo a la norma IEC 60095-1:2018 en el Laboratorio de Control de Calidad
- Se realizó la validación del método Capacidad de 20 h como requisito de la norma ISO/IEC 17025:2017
- Se identificaron las fuentes de incertidumbre asociadas al ensayo de Capacidad de 20 h.
- Se evaluó el modelo matemático para expresar la incertidumbre del ensayo.
- Se calculó la incertidumbre del método de ensayo de capacidad de 20 h para cada nivel.

- Los valores de incertidumbre expandida son: 0.53 Ah para el nivel de 32 Ah, 0.44 Ah para el nivel de 79 Ah y 2.3 Ah para el nivel de 205 Ah, los cuales representan 1.6%, 0.5% y 1.1% respectivamente.
- Para el ensayo de capacidad de 20 h – nivel 1 se obtuvo como resultado 33.57 Ah  $\pm$  0.53 Ah (con un factor de cobertura  $k = 2$ , para un nivel de confianza del 95 %), por lo tanto cumple con la especificación de capacidad nominal la cual es 32 Ah.
- Para el ensayo de capacidad de 20 h - nivel 2 se obtuvo como resultado 83.79 Ah  $\pm$  0.44 Ah (con un factor de cobertura  $k = 2$ , para un nivel de confianza del 95 %), por lo tanto cumple con la especificación de capacidad nominal la cual es 79 Ah.
- Para el ensayo de capacidad de 20 h – nivel 3 se obtuvo como resultado 210.46 Ah  $\pm$  2.3 Ah (con un factor de cobertura  $k = 2$ , para un nivel de confianza del 95 %), por lo tanto cumple con la especificación de capacidad nominal la cual es 205 Ah.
- Este proyecto utilizará criterios de mejora continua para que en futuros estudios se obtenga una metodología más precisa, el mismo que servirá como fuente de estudios para posteriores métodos de ensayos en baterías de plomo-ácido de 12 V.

### **5.1.2 Recomendaciones**

- Se pueden reducir los porcentajes de la incertidumbre de este ensayo para cada nivel: mejorando la resolución de los equipos utilizados y principalmente contratando los servicios de calibración de un laboratorio acreditado con menor aporte de incertidumbre.
- Se recomienda utilizar muestras de baterías homogéneas, baterías del mismo lote con la menor variación posible en proceso para así afinar la validación del método y que los estudios de R&R presenten mejores resultados y menos variación.

## 6. REFERENCIAS

- Automotive Industry Action Group (AIAG). (2010). *Measurement Systems Analysis Reference Manual* (4th ed.).
- BOSCH. (s.f.). Manual de Baterías Bosch.
- Désenfant, M., & Priel, M. (2016). Reference and additional methods for measurement uncertainty evaluation. *Measurement*, 1-3.
- EURAMET eV 2008. (2008). *Metrología Abreviada*. España.
- Gella Tomás, F. (2013). Notas de la historia de la metrología en las Ciencias del. *Elsevier*, 1-3.
- Göbel, E., Mills, I., & Wallard, A. (28 de Diciembre de 2020). *Centro Español de Metrología*. Obtenido de Metrología:  
[https://www.cem.es/sites/default/files/files/resumen%20del%20sistema\\_internacional\\_de\\_unidades.pdf](https://www.cem.es/sites/default/files/files/resumen%20del%20sistema_internacional_de_unidades.pdf)
- GUIDE IEC 115. (2007). Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector (Guide 115).
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2009). *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma*. México: McGRAW-HILL.
- IEC 60095-1. (Noviembre de 2018). Lead-acid starter batteries – Part 1: General requirements and methods of test (IEC 60095-1).
- INEN. (31 de Diciembre de 2020). *Servicio Ecuatoriano de Normalización*. Obtenido de Reseña Histórica: <https://www.normalizacion.gob.ec/resena-historica/>
- INEN. (31 de Diciembre de 2020). *Servicio Ecuatoriano de Normalización*. Obtenido de Misión y Valores Institucionales: <https://www.normalizacion.gob.ec/mision-y-valores-institucionales/>
- ISO/IEC. (Noviembre de 2017). Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración ISO/IEC 17025.
- JCGM 100. (2008). Guía para la expresión de la incertidumbre de medida.
- JCGM 200. (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM)*.
- Kirchev, A. (2015). Battery Management and Battery. En *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing* (págs. 411-412). Elsevier B.V.

- Lazos Martínez, R. J., & Hernández Gutiérrez, I. (2004). La validación de métodos: Un enfoque práctico. *Simposio de Metrología*, 1-2.
- NTE INEN-IEC. (Enero de 2014). Vocabulario Electrotécnico. Parte: 482. Pilas y Acumuladores Eléctricos (IEC 60050-482).
- Oficina Internacional de Pesas y Medidas. (2013). *El Sistema Interacional de Unidades*.
- Servicio de Acreditación Ecuatoriano. (2019). *PL02-R03 Política para la estimación de la incertidumbre de la medición*.
- Theodorou, D., Meligotsidou, L., Karavoltsos, S., Burnetas, A., Dassenakis, M., & Scoulios, M. (2010). Comparison of ISO-GUM and Monte Carlo methods for the evaluation of measurement uncertainty: Application to direct cadmium measurement in water by GFAAS. *Talanta*, 1568-1571.
- Tomás, F. J. (2013). Notas de la historia de la metrología en las Ciencias del Laboratorio Clínico. *Revista del Laboratorio Clínico*, 128-131.
- Willink, R. (2016). What can we learn from the GUM of 1995? *Measurement*, 1-2.

## **7. APÉNDICES Y ANEXOS**

En los apéndices o anexos se considera información adicional, relevante aunque no esencial para el trabajo. Por ejemplo, se pueden incluir los datos sin procesar y las estadísticas, códigos de archivos ingresados y obtenidos de programas de computación, especificaciones y detalles de diseño. Los cuadros y figuras se enumerarán con una secuencia distinta del artículo principal, por ejemplo: Fig. A1, Fig. A2, etc. Cada apéndice/anexo se designará con una letra mayúscula (Apéndice A, Apéndice B...), llevará un título y se ubicará en una nueva página.