

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LAS
MEDICIONES DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UNIVERSIDAD
INDUSTRIAL DE SANTANDER

ANDRÉS JULIÁN ARIZA CASTELLANOS
JORGE ELIECER DUARTE SUÁREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2017

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LAS
MEDICIONES DEL LABORATORIO DE ALTA TENSION DE LA UNIVERSIDAD
INDUSTRIAL DE SANTANDER

JORGE ELIECER DUARTE SUÁREZ
ANDRÉS JULIÁN ARIZA CASTELLANOS

TRABAJO DE GRADO EN LA MODALIDAD INVESTIGACIÓN PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIEROS ELECTRICISTAS

Director:

JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO
Ingeniero Electricista-Magíster en Potencia Eléctrica

Codirector:

GABRIEL ORDOÑEZ PLATA
Ingeniero Electricista-Doctor Ingeniero Industrial en Ingeniería Eléctrica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2017

DEDICATORIA

A Dios, por la bendición de concederme una gran familia, los privilegios que he tenido en la vida, además de la fortaleza y la sabiduría.

A mis padres, Carmen Aida y Yezid Emiro, por ser mi principal influencia, mi incondicional apoyo y orgullo. Conmigo estará presente su invaluable esfuerzo en darme siempre lo mejor.

A mi hermano, David Alejandro, mi mejor amigo. Le deseo éxitos, bendiciones y grandes logros en su futuro. Espero servirle de ejemplo en su proyecto de vida y que los lazos de hermandad se fortalezcan con el tiempo.

A Jenny Viviana, por su entrega y perseverancia, que a pesar de las dificultades siempre ha estado presente con su compañía y amor.

A toda mi familia y amigos, por su presencia y voz de aliento.

ANDRÉS JULIÁN

A mis padres, Luis Enrique y Nelly, sin su apoyo incondicional e impecable
enseñanza nada sería posible

A mi hermano, Nelson, y su esposa Liliana, su confianza en mí es y será siempre
una fuente de inspiración.

A mi sobrina, Liceth Carolina, de quien anhelo vivir para ver cumplido alguno de
sus sueños.

A familiares y amigos

Pues cada uno hace parte de lo que pienso y de lo que soy.

JORGE ELIECER

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por las bendiciones recibidas en el transcurso de nuestras vidas.

A las familias Ariza Castellanos y Duarte Suárez, por el incesante apoyo, el esfuerzo y los sacrificios para darnos lo mejor.

A los profesores de la Universidad Industrial de Santander, por su profesionalismo y el acompañamiento educativo, especialmente a los profesores Julio César Chacón y Gabriel Ordoñez, por la asesoría, apoyo y dedicación que tuvieron con nosotros y este trabajo de grado.

A la Universidad Industrial de Santander, por permitirnos ser parte de esta institución.

A nuestros amigos y compañeros, por ser parte fundamental en nuestro desarrollo personal, académico y profesional.

TABLA DE CONTENIDO

	pág
1. INTRODUCCIÓN	20
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	21
2.1 MEDICIONES REALIZADAS EN EL LAT-UIS	21
2.1.1 Medición de señales de corriente alterna	21
2.1.2 Medición de señales tipo impulso	22
2.2 CORRECCIONES ATMOSFÉRICAS	28
2.2.1 Condiciones atmosféricas	28
2.2.2 Factores de corrección atmosférica (FCA)	29
2.2.3 Correcciones atmosféricas mediante el método 2	29
2.3 MEDIDAS DE PARÁMETROS ATMOSFÉRICOS	34
2.3.1 Humedad	34
2.3.2 Temperatura	35
2.3.3 Presión absoluta	35
2.4 INCERTIDUMBRE DE MEDIDA	35
2.4.1 Consideraciones generales	35
2.4.2 Modelo de medición	36
2.4.3 Términos usados en la evaluación de la incertidumbre:	37
2.4.4 Evaluación de la incertidumbre tipo A	38
2.4.5 Evaluación de incertidumbre estándar tipo B	39
2.4.6 Incertidumbre estándar combinada	41
2.4.7 Incertidumbre expandida	44

2.4.8	Factor de cobertura y grados de libertad efectivos.....	44
2.4.9	Grados de libertad de una contribución tipo B	46
2.4.10	Pasos para el cálculo de la incertidumbre expandida.....	48
2.5	REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD	49
2.6	FUENTES GENERALES DE INCERTIDUMBRE	50
2.6.1	Incertidumbre de los equipos	50
2.6.2	Lectura sesgada de los instrumentos.....	51
2.6.3	Muestra no representativa del mensurando	51
2.6.4	Valores inexactos de constantes y otros parámetros tomados de fuentes externas, utilizados en el algoritmo de tratamiento de los datos	51
3.	METODOLOGÍA PROPUESTA PARA REALIZAR LAS PRÁCTICAS EN EL LAT-UIS.....	52
4.	EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	57
4.1	MEDICIÓN DE LA TENSIÓN POR EFECTO CORONA.....	58
4.2	DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DE RUPTURA DIELECTRICA EN ACEITES AISLANTES.....	63
4.3	OBTENCIÓN DE FORMAS DE ONDA NORMALIZADA	68
4.4	DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DE CHISPA $V_{50\%}$	78
4.5	TENSIÓN DE CHISPA $V_{50\%}$ CON CORRECCIONES ATMOSFÉRICAS .	82
4.6	ENSAYOS SOBRE DISPOSITIVOS CONTRA SOBRETENSIONES (DPS) EN CORRIENTE ALTERNA	90
4.7	ENSAYOS SOBRE DISPOSITIVOS CONTRA SOBRETENSIONES (DPS) CON PRUEBAS DE IMPULSO	95
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	102
5.1	TENSIÓN CORONA	102

5.2	TENSIÓN DE RUPTURA.....	103
5.3	PRUEBAS DE IMPULSO.....	104
5.4	TENSIÓN DE CHISPA.....	106
5.5	ENSAYOS DPS.....	108
6.	CONCLUSIONES	111
7.	BIBLIOGRAFÍA	113
8.	ANEXOS	114

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1.Representación del esquema de medida de tensión de corriente alterna en el LAT-UIS.	22
Figura 2.Onda de impulso atmosférico normalizada.....	23
Figura 3.Señal de impulso atmosférico recortada en la cola.	24
Figura 4.Señal de impulso atmosférico recortada en el frente.....	24
Figura 5.Señal de impulso tipo maniobra.....	25
Figura 6.Esquema general de un generador de impulsos de tensión tipo Marx. ...	26
Figura 7.Circuito para impulso atmosférico. Onda completa y recortada.....	27
Figura 8.Circuito para impulso maniobra. Onda completa	27
Figura 9. Grafica de la constante k en función de la humedad absoluta.....	31
Figura 10.Valores de los exponentes m y n para corrección por densidad del aire y w para corrección de humedad en función de la distancia de cebado.....	33
Figura 11.Distribuciones de probabilidad más comunes.....	40
Figura 12.Diagrama de flujo propuesto para la evaluación de la Incertidumbre en el LAT-UIS.	53
Figura 13.Esquema para la medición del efecto corona.	58
Figura 14.Grafica de impulso atmosférico para tiempo de frente.....	72
Figura 15.Esquema para montajes de DPS para ensayos de corriente alterna. ...	91
Figura 16.Esquema para montajes de DPS para ensayos de impulso atmosférico	95
Figura 17.Incertidumbre relativa de la tensión corona.	103
Figura 18.Incertidumbre relativa de la tensión de ruptura y rigidez dieléctrica ..	104
Figura 19.Incertidumbre relativa de los diferentes parámetros de impulso atmosférico	105
Figura 20.Incertidumbre relativa de los diferentes parámetros de impulso maniobra	106

Figura 21.Incertidumbre expandida relativa de la tensión de chispa con y sin correcciones atmosféricas	107
Figura 22.Incertidumbre expandida relativa de la tensión de cebado y tensión de reposición de dos DPS.	108
Figura 23..Incertidumbre expandida relativa de la corriente de drenaje de un DPS de SiC para diferentes niveles de tensión de corriente alterna.	109
Figura 24.Incertidumbre expandida relativa de la corriente de drenaje de un DPS de ZnO para diferentes niveles de tensión de corriente alterna.....	109
Figura 25.Incertidumbre expandida relativa de los parámetros de un DPS de SiC en prueba de impulso atmosférico.....	110
Figura 26.Incertidumbre expandida relativa de los parámetros de un DPS de ZnO en prueba de impulso atmosférico.	110

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Aplicación de factores de corrección atmosféricos.	32
Tabla 2. Contenido de vapor de agua del aire saturado para algunas temperaturas.	34
Tabla 3. Valor de t_p a partir del número de grados de libertad con 4 niveles de confianza.	47
Tabla 4. Características concernientes a cada práctica.	54
Tabla 5. Toma de datos para la evaluación de la incertidumbre tipo A.	55
Tabla 6. Coeficientes de sensibilidad.	55
Tabla 7. Cálculos pertinentes a los coeficientes de correlación.	56
Tabla 8. Cálculos pertinentes a la incertidumbre tipo A y tipo B.	56
Tabla 9. Resultados finales de la evaluación de incertidumbre.	57
Tabla 10. Niveles de tensión del divisor resistivo en alta y baja.	59
Tabla 11. Tensión medida en lado de baja para cada nivel de tensión correspondiente al lado de alta.	59
Tabla 12. Expresión del mensurando para cada nivel de tensión de prueba.	62
Tabla 13. Muestras de tensión de ruptura y rigidez dieléctrica.	63
Tabla 14. Expresión del mensurando para las pruebas de tensión de ruptura y rigidez dieléctrica.	68
Tabla 15. Escala y resolución de los equipos de medida respecto a las variables de interés para los impulsos atmosféricos y de maniobra.	69
Tabla 16. Valores de tiempo hallados en la gráfica y aproximado a la resolución de medida.	72
Tabla 17. Resultados de mensurando de tiempo de frente para impulso atmosférico.	77
Tabla 18. Resultados de mensurando de tiempo de cola para impulso atmosférico.	77

Tabla 19.Resultados de mensurando de tiempo de recorte para impulso atmosférico.	77
Tabla 20.Resultados de mensurando de tiempo de frente para impulso maniobra.....	77
Tabla 21.Resultados de mensurando de tiempo de cola para impulso maniobra..	78
Tabla 22.Recopilación de datos de la prueba up and down	78
Tabla 23.Tratamiento estadístico de los datos.....	79
Tabla 24.Resultados del mensurando de tensión de chispa.....	81
Tabla 25.Muestras correspondientes a la prueba 1 de todas las variables medibles para la prueba de $V_{50\%}$	83
Tabla 26.Promedio, desviación estándar e incertidumbre estándar de todas las variables.	83
Tabla 27.Cálculos pertinentes a la incertidumbre tipo A.	86
Tabla 28.Cálculos pertinentes a los coeficientes de correlación para la incertidumbre tipo A.....	87
Tabla 29.Cálculos pertinentes a la incertidumbre tipo B.	88
Tabla 30.Resultados finales para las pruebas de tensión de chispa $V_{50\%}$ con correcciones atmosféricas	90
Tabla 31.Medidas para la tensión de cebado para todas las pruebas en el lado de baja tensión.....	92
Tabla 32.Resultados finales para las tensiones de cebado y reposición en DPS en el lado de alta tensión.	93
Tabla 33.Resultados de la prueba de corriente de drenaje en DPS SiC.	94
Tabla 34.Resultados de la prueba de corriente de drenaje en DPS ZnO.	94
Tabla 35.Escala y resolución del equipo de medida respecto a las variables de interés para los DPS de SiC y ZnO.....	96
Tabla 36.Resultado de los mensurandos de tensión y tiempo para la prueba de impulso en DPS de SiC.	100
Tabla 37.Resultado de los mensurandos de corriente y tiempo para la prueba de impulso en DPS de SiC.	100

Tabla 38.Resultado de los mensurandos de tensión y tiempo para la prueba de impulso en DPS de ZnO. 101

Tabla 39.Resultado de los mensurandos de corriente y tiempo para la prueba de impulso en DPS de ZnO 101

ANEXOS

	pág
Anexo A: Tablas de datos de equipos	114
Anexo B: Tablas de resultados parciales.....	119
Anexo C: Tabla T-student de dos colas.....	139
Anexo D: Tutorial.....	140

RESUMEN

TÍTULO: METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.^x

AUTORES: ANDRÉS JULIÁN ARIZA CASTELLANOS

JORGE ELIECER DUARTE SUÁREZ^{xx}

PALABRAS CLAVE: Alta tensión, mediciones, laboratorio, incertidumbre.

CONTENIDO:

En este documento se describe el proceso realizado para establecer una metodología que permita la estimación de la incertidumbre de las mediciones del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander, teniendo en cuenta la literatura pertinente en este tema de acuerdo a estándares internacionales y que dicha metodología se pueda ajustar a las necesidades y condiciones del laboratorio.

Se aplicó la metodología propuesta a cada una de las prácticas del laboratorio, detallando los pasos necesarios para el cálculo de la incertidumbre, teniendo en cuenta las características de cada uno de los procesos de medición tales como el modelo físico del mensurando, equipo de medida, operario y montaje de medición, así como una recopilación de datos en las diferentes sesiones del laboratorio, de manera que se pueda obtener una variedad en las condiciones de medida, que permite un análisis de resultados para tomar decisiones sobre el proceso de medición. Se diseñó una ayuda computacional con el fin simplificar el proceso matemático involucrado, que en determinados casos puede demandar cálculos complejos.

Este trabajo se presenta como una primera aproximación al problema planteado, que sirva como precedente para análisis posteriores en este tema, de manera que el estudio de incertidumbre pueda formar parte de los procesos que se orientan en el LAT-UIS.

^x Proyecto de Grado: Trabajo de Investigación

^{xx} Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Julio César Chacón Velasco.

ABSTRACT

TITLE: METHODOLOGY FOR THE ESTIMATION OF UNCERTAINTY IN THE MEASUREMENTS OF THE HIGH VOLTAGE LABORATORY OF THE INDUSTRIAL UNIVERSITY OF SANTANDER.^x

AUTHORS: ANDRÉS JULIÁN ARIZA CASTELLANOS

JORGE ELIECER DUARTE SUÁREZ^{xx}

KEYWORDS: High voltage, measurements, laboratory, uncertainty.

DESCRIPTION:

This document describes the process to establish a methodology that allows the estimation of the uncertainty of the measurements of the High Voltage Laboratory of the Industrial University of Santander, taking into account the relevant literature in this subject according to international standards and that This methodology can be adjusted to the needs and conditions of the laboratory.

The proposed methodology was applied to each of the laboratory practices, detailing the steps necessary for the calculation of uncertainty, taking into account the characteristics of each of the measurement processes such as the physical model of the measurand, measurement equipment, Operator and measurement assembly, as well as a collection of data in the different sessions of the laboratory, so that a variety can be obtained under the measurement conditions, which allows an analysis of results to make decisions about the measurement process. A computational aid was designed in order to simplify the mathematical process involved, which in certain cases may require complex calculations.

This work is presented as a first approximation to the presented problem, which serves as a precedent for later analysis in this subject, so that the study of uncertainty can be part of the processes that are oriented in the LAT-UIS.

^x Bachelor Thesis

^{xx} Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Julio César Chacón Velasco.

1. INTRODUCCIÓN

La medición en la ingeniería es una de las herramientas principales en la toma de decisiones, pues por definición la medida se encuentra como el vínculo inequívoco entre la teoría y la experimentación, parte fundamental del método científico y pilar de la ingeniería. La diferencia entre una buena o mala decisión puede llegar a depender casi exclusivamente de una buena medida, sumado naturalmente a un buen criterio y análisis de la misma, por tanto es necesario conocer las medidas, comprender las limitaciones del valor que se ofrece como una aproximación a la magnitud real, es decir la incertidumbre a la que siempre se estará sometida por la naturaleza de la medición y naturalmente, por las características del aparato con el cual se esté tomando directa, o indirectamente dicha medida.

En este sentido, la estadística ofrece herramientas para estimar dicha incertidumbre, un rango posible de valores entre los cuales oscila el valor “real”, basándose en consideraciones que involucran tanto la calidad de la información que brinda el instrumento de medida (calibración), como el modelo matemático que se utiliza para la estimación del mencionado valor (leyes físicas).

El presente documento contiene el proceso realizado para lograr una aproximación al problema de evaluar la incertidumbre en las medidas de alta tensión que se llevan a cabo en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander (LAT UIS), proceso basado en la literatura correspondiente a las normas internacionales pertinentes a este tema, y adaptado a las condiciones específicas de las prácticas que allí se realizan.

Como en cualquier proceso de medición, se procura obtener la mejor estimación posible del mensurando y una estimación de su incertidumbre, teniendo en cuenta los principales factores que pueden aportar a la misma y las determinadas

limitaciones que se encuentran debido, o bien a causas intrínsecas del proceso, o a las condiciones bajo las cuales se efectúa.

Este trabajo de grado tiene como objetivo además de diseñar una metodología que permita evaluar cuantitativamente la incertidumbre de las medidas que se realizan, analizar las consideraciones que se tuvieron en cuenta y aplicar esta metodología para obtener un conocimiento más detallado acerca de la naturaleza de los diferentes montajes realizados, aplicando conceptos como la repetibilidad y la reproducibilidad de las mediciones obtenidas, y de esta forma generar un precedente para posteriores análisis relacionados con este tema. Se anexarán las herramientas que sean necesarias para efectuar el modelo propuesto.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

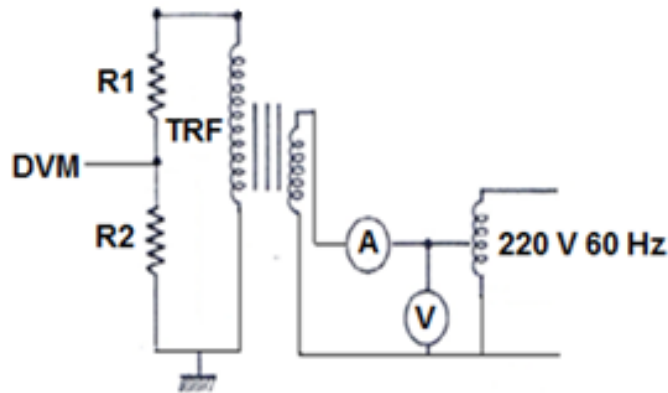
En este capítulo se presentarán algunas definiciones y descripciones relacionadas a la naturaleza de las mediciones que se realizan en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander (LAT-UIS).

2.1 MEDICIONES REALIZADAS EN EL LAT-UIS

En el LAT-UIS se realizan mediciones que de acuerdo a la naturaleza de la onda de tensión se pueden clasificar como se indica a continuación:

2.1.1 Medición de señales de corriente alterna. En el laboratorio se realizan prácticas que involucran la aplicación de tensión de corriente alterna a diferentes objetos de prueba, para esto se gradúa la tensión a través de una consola de mando que gobierna un transformador conectado a la red primaria disponible, de frecuencia 60 Hz nominal. La Figura 1 muestra un esquema con la representación de la medida realizada en el LAT-UIS.

Figura 1. Representación del esquema de medida de tensión de corriente alterna en el LAT-UIS.



Fuente: RUGELES, J., & CHACÓN, J. C. (s.f.). *Laboratorio de Alta Tensión Manual de Prácticas*. UIS.

2.1.2 Medición de señales tipo impulso. Los sistemas eléctricos soportan con cierta regularidad sobretensiones que pueden comprometer el buen funcionamiento de la red y en ocasiones generar daños graves en la misma, sobretensiones que son causadas generalmente por dos factores principales: descargas atmosféricas y maniobras. Esto genera la necesidad de producir señales que proporcionen un criterio de evaluación de los equipos que soportan estas condiciones durante determinados intervalos de tiempo.

Se define un IMPULSO DE TENSIÓN de acuerdo a estándares internacionales como una tensión unidireccional que crece de forma rápida hasta un valor máximo y decrece gradualmente hasta extinguirse completamente.

Un impulso de tensión está caracterizado por los siguientes parámetros:

Polaridad

Valor de cresta (máximo)

Duración del frente (que precede a la cresta) T_1

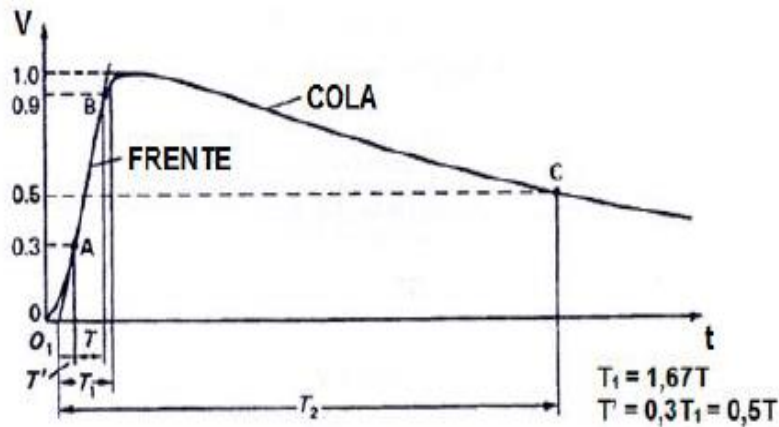
Duración de la cola (hasta el hemivalor) T_2

Se identifican de acuerdo a la naturaleza de su origen dos tipos de impulsos:

Impulso atmosférico (tipo rayo) e impulso maniobra (tipo conmutación).

2.1.2.1 Impulso atmosférico. Este impulso de tensión se caracteriza por tener tiempos de frente que no superan los $20\mu s$. En la Figura 2 se muestra la forma típica de una onda de tensión de tipo impulso atmosférico, normalizada con sus diferentes parámetros de tiempo.

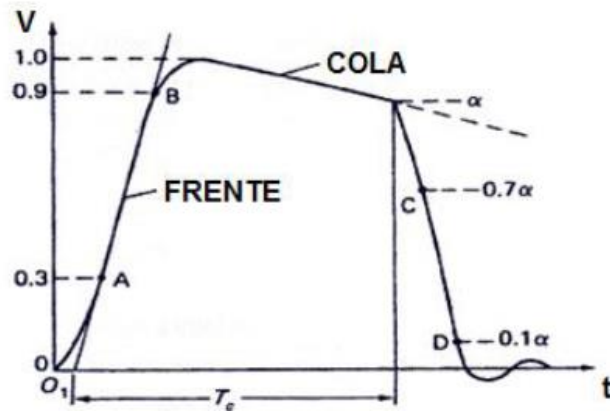
Figura 2. Onda de impulso atmosférico normalizada.



Fuente: RUGELES, J., & CHACÓN, J. C. (s.f.). *Laboratorio de Alta Tensión Manual de Prácticas*. UIS.

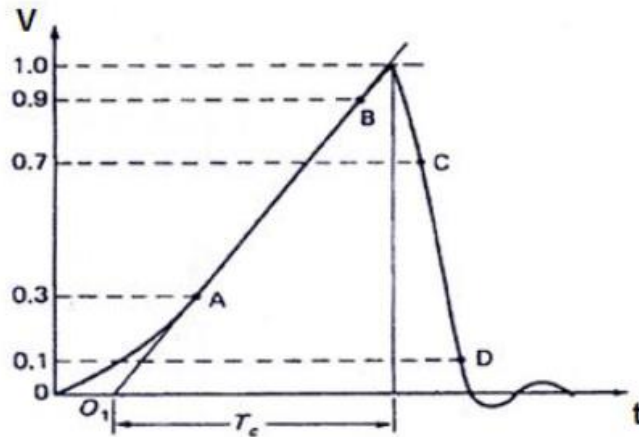
Una onda de impulso atmosférico recortada presenta una caída rápida de tensión en un intervalo de tiempo mucho menor al esperado en impulso pleno, como se muestra en las figuras 3 y 4.

Figura 3. Señal de impulso atmosférico recortada en la cola.



Fuente: RUGELES, J., & CHACÓN, J. C. (s.f.). *Laboratorio de Alta Tensión Manual de Prácticas*. UIS.

Figura 4. Señal de impulso atmosférico recortada en el frente.



Fuente: RUGELES, J., & CHACÓN, J. C. (s.f.). *Laboratorio de Alta Tensión Manual de Prácticas*. UIS.

El impulso atmosférico normalizado es un impulso pleno con una duración de frente de $1,2 \mu s$ y una duración hasta la cola T_2 de $50 \mu s$, denominado impulso 1,2/50.

Los porcentajes de tolerancia para ensayos dados por la norma IEC 60.1 son los siguientes:

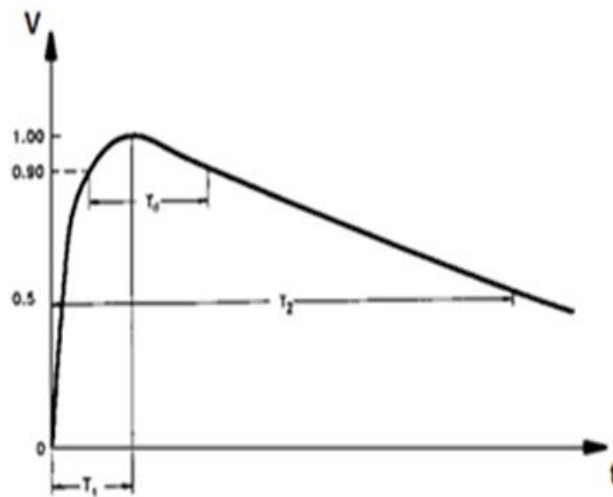
$$T_1 = 1,2 \pm 30\% [\mu s]$$

$$T_2 = 50 \pm 30\% [\mu\text{s}]$$

No se debe confundir estos valores de tolerancias con la incertidumbre de la medición, que se tratará más adelante.

2.1.2.2 Impulso maniobra. Una onda de sobretensión que supera el tiempo de frente convencional de $10\mu\text{s}$ se considera una sobretensión de maniobra. La Figura 5 representa una señal de impulso tipo maniobra con sus respectivos parámetros.

Figura 5. Señal de impulso tipo maniobra.



Fuente: RUGELES, J., & CHACÓN, J. C. (s.f.). *Laboratorio de Alta Tensión Manual de Prácticas*. UIS.

El impulso maniobra normalizado denominado impulso 250/2500 es un impulso con una duración hasta la cresta de $250\mu\text{s}$ y una duración hasta la cola de $2500\mu\text{s}$.

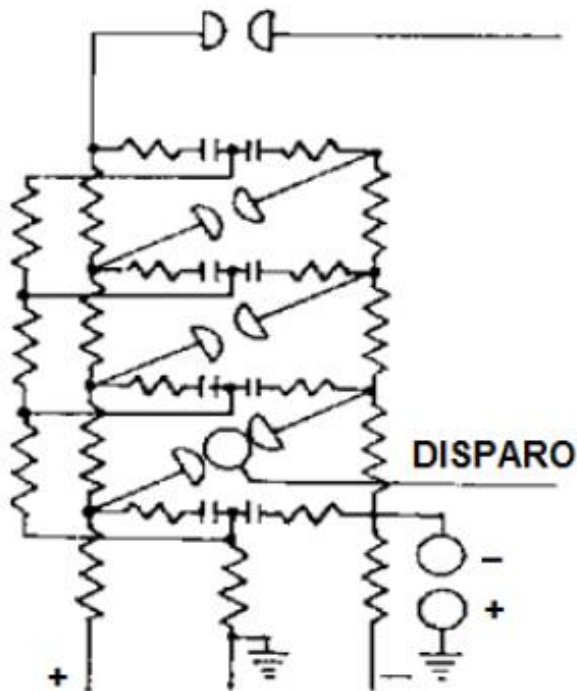
Los valores de tolerancia especificados son los siguientes:

$$T_1 = 250 \pm 20\% [\mu\text{s}]$$

$$T_2 = 2500 \pm 60\% [\mu\text{s}]$$

Los ensayos de aislamiento a impulso normalizado se realizan con generadores de impulso, GI de tensión. El esquema básico de los generadores de impulso es generalmente el de Marx (multietapa) que se muestra en la Figura 6.

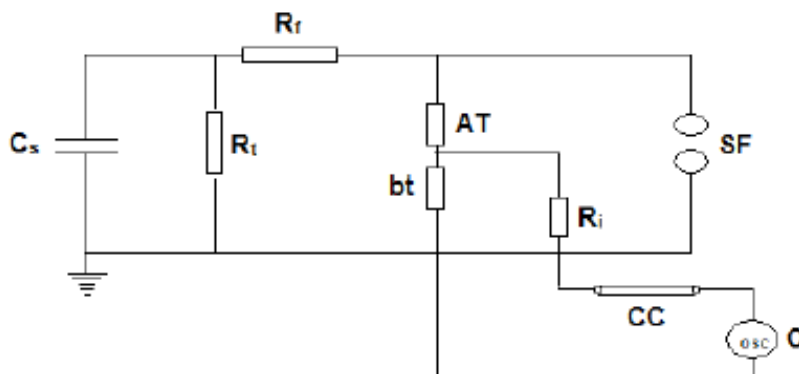
Figura 6. Esquema general de un generador de impulsos de tensión tipo Marx.



Fuente: RUGELES, J., & CHACÓN, J. C. (s.f.). *Laboratorio de Alta Tensión Manual de Prácticas*. UIS.

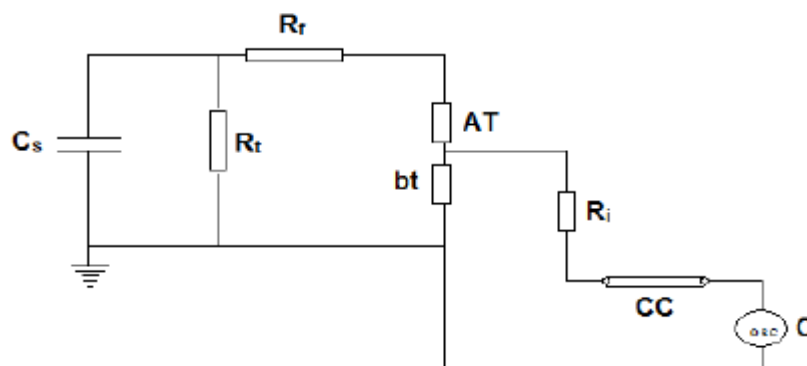
A continuación, en las figuras 7 y 8 se muestran los circuitos equivalentes que corresponden a las pruebas de impulso atmosférico e impulso maniobra.

Figura 7. Circuito para impulso atmosférico. Onda completa y recortada



Fuente: RUGELES, J., & CHACÓN, J. C. (s.f.). *Laboratorio de Alta Tensión Manual de Prácticas*. UIS.

Figura 8. Circuito para impulso maniobra. Onda completa



Fuente: RUGELES, J., & CHACÓN, J. C. (s.f.). *Laboratorio de Alta Tensión Manual de Prácticas*. UIS.

Donde:

C_s -grupo de capacitores del generador de impulsos de tensión

R_t -resistencia en paralelo de la cola

R_f -resistencia serie del frente

AT-capacitancia de alta tensión del divisor capacitivo

Bt-capacitancia de baja tensión

R_i-resistencia del terminal de acople

CC- cable coaxial

O-osciloscopio

SF-espinterómetro con esferas de 25 cm de diámetro

La medición, en los diferentes ensayos de alta tensión conocidos, se realiza de forma indirecta, a través de un divisor; actualmente el LAT-UIS cuenta con dos divisores de tensión, uno capacitivo y uno resistivo con las siguientes relaciones:

$$R_{capacitivo} = 720,5: 1$$

$$R_{resistivo} = 1055: 1$$

El capacitivo es usado para las mediciones de las señales impulsionales, en tanto que el resistivo para las de corriente alterna.

2.2 CORRECCIONES ATMOSFÉRICAS

Los fenómenos eléctricos en general, y especialmente los relacionados con altas tensiones pueden experimentar cambios en los resultados debido a las condiciones atmosféricas en que se realizan, por esto se decide seguir el procedimiento contemplado en la norma IEEE-Std-4-2013 para la corrección de valores a condiciones estándar de laboratorio.

2.2.1 Condiciones atmosféricas. Los niveles de referencia de las condiciones atmosféricas son:

Temperatura $t_0 = 20\text{ °C}$

Presión $b_0 = 101,3 \text{ kPa (1013 mbar)}$

Humedad absoluta $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$

Una presión de 101,3 kPa corresponde a la altura de 760 mm en un barómetro de mercurio a 0 °C. La presión atmosférica en kilo pascales es aproximadamente

$$b = 0,1333H \quad (1)$$

Donde

b : Es la presión barométrica (en kPa).

H : Es la altura barométrica (en mmHg).

2.2.1 Factores de corrección atmosférica (FCA). Una descarga disruptiva medida a condiciones de prueba (temperatura t , presión p , humedad h) se puede convertir a condiciones de referencia (t_0 , b_0 , h_0), mediante la aplicación de factores de corrección.

Se utilizan dos métodos para la corrección de las pruebas de tensión:

Método 1: correcciones atmosféricas usando un factor K .

Método 2: correcciones atmosféricas usando factores k_d y k_h .

Debido a las condiciones y equipos de los que se dispone en el laboratorio (los ensayos se aplican a elementos con una distancia mínima de ruptura inferior a 1m), de acuerdo a la norma IEEE-Std-4-2013, se debe utilizar el método 2.

2.2.2 Correcciones atmosféricas mediante el método 2. Con este método el factor de corrección se descompone en:

Factor de corrección de densidad del aire k_d

Factor de corrección de humedad k_h

Estos factores se calculan de la siguiente manera:

$$k_d = \left(\frac{p}{p_0}\right)^m \left(\frac{273 + t_0}{273 + t}\right)^n \quad (2)$$

Donde

p : Es la presión atmosférica a condiciones de prueba.

t : Es la temperatura en °C a condiciones de prueba.

Asimismo, el factor de corrección de humedad está dado por:

$$k_h = k^w \quad (3)$$

La constante k se muestra en la Figura 9 como una función de la humedad absoluta.

Para efectos de la posterior evaluación de la incertidumbre es necesario conocer un modelo aproximado que represente los datos de la Figura 9, en este caso se usarán las aproximaciones¹ que se describen a continuación:

Para pruebas de impulso y corriente continua (curva b):

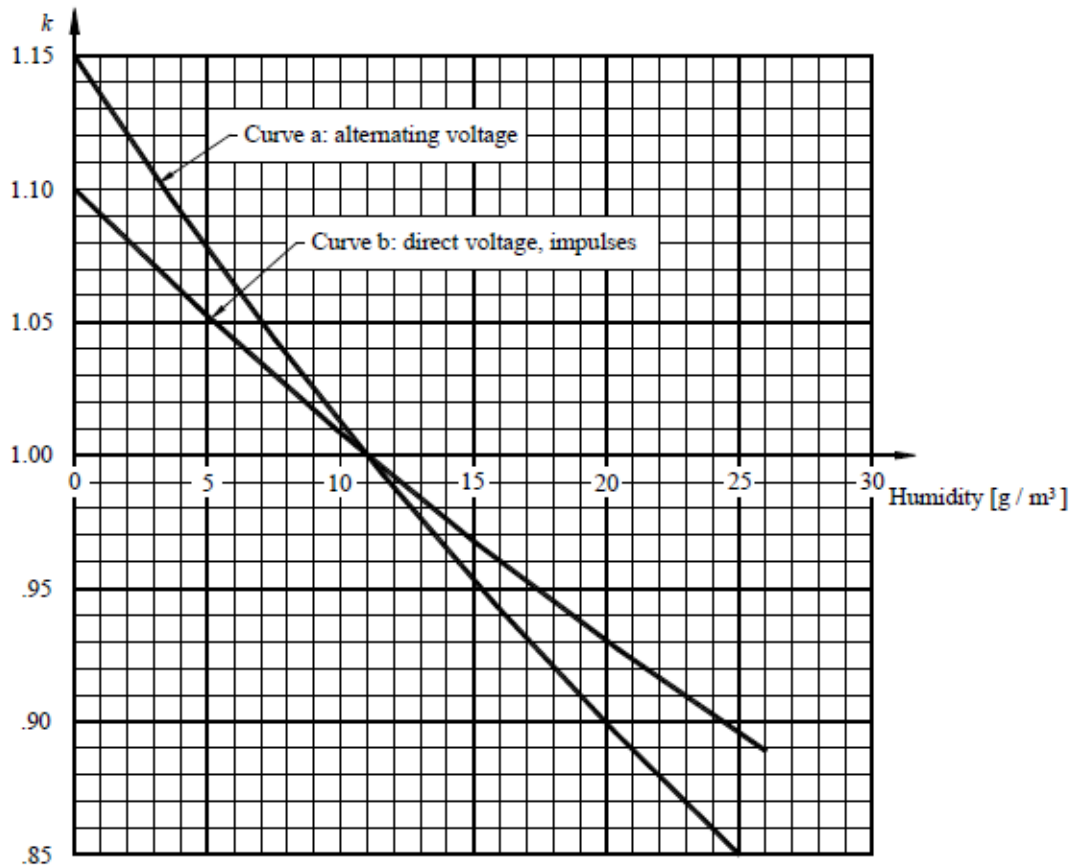
¹ LASTRE GOMEZ, Hedier Humberto. *Contrastación de las normas existentes en el cálculo de los factores de corrección por condiciones atmosféricas utilizando electrodos punta - placa.* Bucaramanga : UIS, 1996.

$$k = 6,801942 \cdot 10^{-5}h^2 - 9,831233 \cdot 10^{-3}h + 1,098898 \quad (4)$$

Para pruebas de corriente alterna (curva a):

$$k = 1,1811 \cdot 10^{-4}h^2 - 1,442 \cdot 10^{-2}h + 1,1435 \quad (5)$$






Figura 9. Grafica de la constante k en función de la humedad absoluta.



Fuente: IEEE Power and Energy Society. (2013). *Std 4*.




Los exponentes m , n y w dependen del tipo de prueba de tensión, la forma de los electrodos y la polaridad de acuerdo a la Tabla 1:

Tabla 1. Aplicación de factores de corrección atmosféricos.

Tipo de prueba de Tensión	Forma de los electrodos	Polaridad	Exponentes de corrección de la densidad del aire m y n (ver nota 2)	Correcciones de Humedad	
				Factor k	Exponente w
Tensión directa		+	1	Ver (curva b)	0
		-			0
		+			1
		-			1
Tensión alterna		+	1	Ver Figura 9 (curva a)	0
		-	Ver Figura 10		Ver Figura 10
		+	Ver Figura 10		Ver Figura 10
		-	Ver Figura 10		Ver Figura 10
Impulso atmosférico		+	1	Ver Figura 9 (curva b)	0
		-			0
		+			1
		-			0.8
Impulso maniobra		+	1	Ver Figura 9 (curva b)	0
		-	1		0
		+	Ver Figura 10		Ver Figura 10
		-	0 (ver nota 1)		0 (ver nota 1)
		+	Ver Figura 10		Ver Figura 10
		-	0 (ver nota 1)		0 (ver nota 1)
		+	Ver Figura 10		Ver Figura 10
		-	0 (ver nota 1)		0 (ver nota 1)

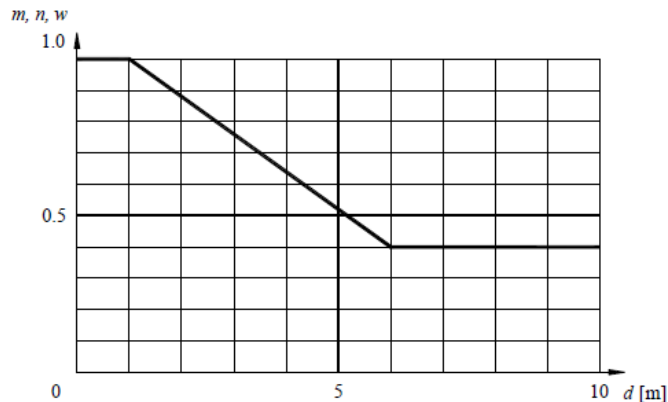
Fuente: IEEE Power and Energy Society. (2013). Std 4.

Los electrodos en la tabla son:

-  Electrodo que proporcionan campos uniformes.
-  Electrodo de punta – punta. Campo no uniforme con distribución simétrica.
-  Electrodo punta – placa. Campo no uniforme con distribución asimétrica.

Para cualquier electrodo que no se encuentre en los anteriores, se utilizarán exponentes $m=n=1$, y no se aplicará corrección por humedad. La Figura 10 muestra los valores de los exponentes m , n y w para realizar las diferentes correcciones requeridas.

Figura 10. Valores de los exponentes m y n para corrección por densidad del aire y w para corrección de humedad en función de la distancia de cebado



Fuente: IEEE Power and Energy Society. (2013). Std 4.

Nota 1: Cuando hay poca información disponible, no se recomiendan correcciones

Nota 2: Los datos experimentales disponibles de diferentes fuentes siempre muestran grandes dispersiones y a menudo contradictorias. La información de tensión directa e impulso atmosférico es escasa. La exactitud de usar exponentes m y n iguales, así como sus respectivos valores es incierta.

2.3 MEDIDAS DE PARÁMETROS ATMOSFÉRICOS

En este apartado se listan algunos de los requisitos que se encuentran en la norma IEEE-Std-4-2013 acerca de las medidas de parámetros atmosféricos.

Humedad

La humedad debe ser preferiblemente determinada con un dispositivo que mida la humedad absoluta, con una incertidumbre que no supere $1 \frac{g}{m^3}$.

En este caso se mide la humedad relativa y por lo tanto es necesario utilizar la información de la Tabla 2 y los correspondientes modelos.

Tabla 2. Contenido de vapor de agua del aire saturado para algunas temperaturas.

Temperatura [°C]	Vapor de agua [g/m ³]
-10	2,10
0	4,80
10	9,40
20	17,33
21	17,70
22	19,00
23	20,00
24	21,30
25	22,67
26	23,67
27	25,00
28	26,67
29	28,33
30	30,33
31	31,67
32	32,67

Fuente: RUGELES, J., & CHACÓN, J. C. (s.f.). Laboratorio de *Alta Tensión Manual de Prácticas*. UIS.

De esta tabla se obtiene una aproximación a través de una regresión²:

$$CV_{H_2O} = 3,0814 \cdot 10^{-4}t^3 + 7,4063 \cdot 10^{-3}t^2 + 0,3289t + 4,9237 \left[\frac{g}{m^3} \right] \quad (6)$$

² Autores.

El modelo además debe incluir la relación entre vapor de agua saturado, humedad relativa y humedad absoluta, la cual se incorpora al modelo descrito en la Ecuación (4) o en la Ecuación (5), dependiendo del caso:

$$h = (CV_{H_2O}) \left(\frac{h_r \%}{100} \right) \quad (7)$$

2.3.1 Temperatura. La temperatura ambiente debe ser medida con una incertidumbre expandida no mayor a 1°C.

2.3.2 Presión absoluta. La presión absoluta ambiente debe ser medida con una incertidumbre expandida no mayor a 0,2 kPa.

2.4 INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

Debido a la extensión del marco conceptual que abarca el tema de la medición, en este numeral se presentarán únicamente los lineamientos generales que se consideran necesarios para evaluar la incertidumbre de medida, precisando las referencias sobre cuales están basados.

2.4.1 Consideraciones generales. El primer aspecto a considerar es el planteamiento del problema, es decir, el objetivo principal del proceso a desarrollar, y en este sentido la siguiente cita es fundamental:

“El objetivo de una medición es determinar el mensurando; esto es el valor de la magnitud particular bajo medición. Por tanto, una medición comienza con una

adecuada definición del mensurando, del método de medida y del procedimiento de medida.”³

De esta manera se menciona al mensurando como protagonista en las diferentes normas relacionadas con el tema de medición y es por ello que la definición del mismo aparece como el primer aspecto a considerar. Sin embargo, en la misma norma se aclara que se trata de un valor estimado, pues no se puede acceder al valor exacto debido a los diferentes errores⁴ que se presentan en el proceso de medida y por tanto lo que se intenta lograr es la mejor estimación del mismo y una estimación adicional de la incertidumbre³ sobre ese valor.

Para llevar a cabo esta tarea es necesario tener las fuentes de incertidumbre que se puedan cuantificar, esto implica un conocimiento detallado, tanto del proceso de medida, como de los modelos utilizados para su análisis.

2.4.2 Modelo de medición. En numerosos casos de medición, el mensurando requerido (o final) Y no es medido de forma directa, sino a partir de magnitudes medibles que se relacionan entre sí, o con parámetros constantes, a través de una relación funcional f que se plantea matemáticamente, teniendo en cuenta las suposiciones y simplificaciones que el fenómeno amerite sin que se pierda la esencia de la medida:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (8)$$

³ JCGM *Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida*. Centro Español de Metrología, 2008. P. 6.

⁴ Cada uno de los conceptos relacionados con la medición acá expresados están adecuadamente definidos en la norma mencionada en la cita anterior

Donde X_1, X_2, \dots, X_N hace referencia a las magnitudes medibles, también conocidas como magnitudes de entrada, que a su vez se pueden considerar como mensurandos, constituyendo así una relación funcional compleja, que en ocasiones puede presentar dificultades para su expresión explícita.

Este es el caso del ejemplo planteado para el cálculo de la tensión de chispa corregida a condiciones atmosféricas estándar, donde es necesaria la utilización de herramientas computacionales que permitan evaluar los algoritmos que involucran directamente el modelo y facilitar el proceso de la estimación de la incertidumbre.

2.4.3 Términos usados en la evaluación de la incertidumbre. A continuación, se presentan las definiciones de los términos usados para definir y evaluar la incertidumbre en un proceso de medida.

Incertidumbre estándar: Incertidumbre resultado de una medida expresada como una desviación estándar

Incertidumbre tipo A: Evaluada mediante análisis estadístico de una serie de medidas

Incertidumbre tipo B: Evaluada por medio de análisis de una serie de informaciones, diferentes al estadístico.

Incertidumbre combinada estándar: Combinación de las incertidumbres estándar individuales, tanto si se producen debido a evaluaciones tipo A o tipo B, usando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada contribución.

Incertidumbre expandida: un intervalo sobre el resultado de una medida dentro del cual el valor del mensurando se cree se encuentra con una probabilidad específica.

2.4.4 Evaluación de la incertidumbre tipo A. La evaluación de una incertidumbre tipo A estándar, se puede basar en cualquier método estadístico válido para tratamiento de datos. Por ejemplo, el cálculo de la desviación estándar de la media de una serie de observaciones independientes.

Estas observaciones independientes pueden realizarse, por ejemplo, en un divisor de tensión, mediante la aplicación de tensión n - veces o tomando n lecturas consecutivas.

Si las n observaciones independientes $X_{i,k}$ de la salida son obtenidas bajo las mismas condiciones de medición, el estimado \bar{X}_i es usualmente el valor medio de la muestra:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_{i,k} \quad (9)$$

Siendo la desviación estándar $s(\bar{X}_i)$ definida como:

$$s(\bar{X}_i) = \left(\frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n (X_{i,k} - \bar{X}_i)^2 \right)^{1/2} \quad (10)$$

Donde

n = es el número de medidas

$X_{i,k}$ =son los valores de medida desde $k=1$ a n

La incertidumbre estándar $u(\bar{X}_i)$ *corregida* asociada con las observaciones se obtiene como:

$$u(\bar{X}_i) = \frac{s(\bar{X}_i)}{\sqrt{n}} \quad (11)$$

Siendo n el número de muestras.

Las fuentes típicas de incertidumbre incluyen, pero no se limitan a:

- Fluctuaciones aleatorias de variables que afectan el mensurando.
- Cambios en la salida de un calibrador u otra fuente de tensión (fluctuación de fuentes).
- Temperatura de un calibrador estándar.
- Incertidumbre en la discriminación.
- Ubicación de un apuntador de escala (error de paralaje).
- Interpolación entre puntos marcados en una escala (error de resolución).

Cuando se calibra una medida de un sistema o componente de alta tensión, se deben tomar múltiples medidas.

2.4.5 Evaluación de incertidumbre estándar tipo B. La evaluación de la incertidumbre tipo B es usualmente basada en juicios científicos usando toda la información relevante disponible, la cual puede incluir:

- Datos de medida previos.
- Experiencia o conocimiento general del comportamiento y propiedades de los materiales relevantes, instrumentos y referencias estándar, tales como estabilidad de largo y corto plazo.
- Efectos de las condiciones ambientales.
- Especificaciones de los equipos de medición, tales como resolución, exactitud, deriva, etc.

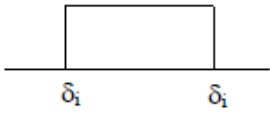
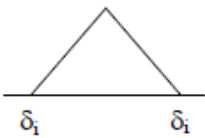
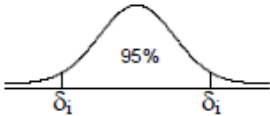
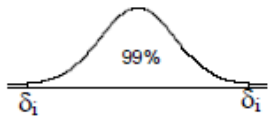
-Datos de calibración y otros reportes.

-Incertidumbres asignadas para referir valores tomados de datos publicados.

Una vez que un sistema de medida (o componente) ha sido calibrado y se usa en una prueba, la incertidumbre de la calibración es tratada como contribución de tipo B a la incertidumbre total del resultado.

Todas las correcciones conocidas deben ser aplicadas a la calibración o medida, y las incertidumbres de esas correcciones deben incluir todas las posibles incertidumbres. En la Figura 11 se muestran las distribuciones de probabilidad más comúnmente usadas y sus desviaciones estándar para definir las incertidumbres en un proceso de medición.

Figura 11. Distribuciones de probabilidad más comunes.

DISTRIBUTION	SHAPE	STANDARD DEVIATION
Uniform		$\frac{\delta_i}{\sqrt{3}}$
Triangular		$\frac{\delta_i}{\sqrt{6}}$
Normal		$\frac{\delta_i}{2}$
Normal		$\frac{\delta_i}{3}$

Fuente: IEEE Power and Energy Society. (2013). *Std 4*.

La distribución uniforme, la cual asume que todos los valores dentro del rango establecido de $\pm\delta_i$ son igualmente probables, tiene una incertidumbre estándar $u(\bar{X}_i)$ dada por $\delta_i/\sqrt{3}$. Este provee el estimado más conservador de la incertidumbre (la desviación estándar máxima) de las cuatro distribuciones mostradas en la Figura 11. Si la incertidumbre tipo B está distribuida normalmente y los límites de $\pm \delta_i$ definen el 95% de probabilidad en el intervalo, la desviación estándar es $\delta_i/2$.

2.4.6 Incertidumbre estándar combinada. Una vez que se han determinado las fuentes y valores de las incertidumbres Tipo B, estas deben combinarse con el estimado de la incertidumbre tipo A en una sola expresión de la incertidumbre combinada estándar para obtener el resultado. El método usual para obtener la incertidumbre estándar combinada, también llamado la ley de propagación de la incertidumbre se describe a continuación.

2.4.6.1 Magnitudes de entrada no correlacionadas. Una vez que todas las incertidumbres de las entradas han sido determinadas, la incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ es:

$$u_c(y) = \left(\sum_1^n u_i^2(y) \right)^{1/2} = \left(\sum_1^n c_i^2 u^2(x_i) \right)^{1/2} \quad (12)$$

Donde:

$u(x_i)$: Es la incertidumbre estándar (tipo A o tipo B) de la magnitud de entrada x_i .

c_i : Es el coeficiente de sensibilidad de la magnitud de entrada x_i .

$u_i(y)$: Es la incertidumbre estándar del mensurando y , obtenida a partir de la incertidumbre estándar de la magnitud de entrada x_i , elevada al cuadrado.

n : Es el número total de entradas

El coeficiente de sensibilidad c_i , se usa para convertir el valor de incertidumbre de una magnitud de entrada $u(x_i)$ a un valor de incertidumbre $u(y)$, en las unidades del mensurando.

El coeficiente de sensibilidad puede ser obtenido mediante el cálculo de las primeras derivadas parciales del mensurando y , respecto a las magnitudes de entrada, de forma analítica, o numérica si la función modelo que describe la relación entre el mensurando y las entradas ha sido establecida (de forma explícita):

$$c_i = \left. \frac{\partial y}{\partial x_i} \right|_{\bar{x}_i} \quad (13)$$

El coeficiente de sensibilidad también puede calcularse experimentalmente (observando los cambios del mensurando respecto a pequeños cambios de la cantidad de entrada). En esencia la definición del coeficiente de sensibilidad es:

$$\text{coeficiente de sensibilidad} = \frac{\text{Cambios en el mensurando}}{\text{pequeños cambios en la magnitud de entrada}}$$

2.4.6.2 Magnitudes de entrada correlacionadas. Cuando el mensurando a obtener depende de variables correlacionadas entre sí, la expresión para evaluar la incertidumbre combinada parte de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
u_c^2(y) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \\
&= \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)
\end{aligned} \tag{14}$$

Donde x_i , x_j son estimaciones de X_i y X_j ,y $u(x_i, x_j)$ es la covarianza estimada asociada a x_i y x_j . El grado de correlación entre x_i y x_j viene dado por

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \tag{15}$$

De esta manera el término de covarianza se puede escribir en función de los coeficientes de correlación, como:

$$2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i)u(x_j)r(x_i, x_j) \tag{16}$$

Finalmente, la incertidumbre estándar combinada, en términos de los coeficientes de correlación se puede calcular como:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i)u(x_j)r(x_i, x_j)} \tag{17}$$

2.4.7 Incertidumbre expandida. Para proporcionar un nivel de confianza sobre el intervalo entre los cuales el valor del mensurando no tiene mucha certeza, la incertidumbre expandida es obtenida por la multiplicación de la incertidumbre estándar combinada por un factor de cobertura k :

$$U = k u_c(y) \quad (18)$$

Para una incertidumbre establecida con suficientes grados de libertad (distribución normal), un valor de k igual a dos proporciona un nivel de confianza de aproximadamente el 95%, mientras un valor de k igual a tres proporciona un nivel de confianza de aproximadamente el 99%.

2.4.8 Factor de cobertura y grados de libertad efectivos. El número de grados de libertad es una medida de la calidad o de la confiabilidad de la incertidumbre estándar. El número de grados de libertad de una contribución a la incertidumbre obtenida por una evaluación tipo A es usualmente el número de lecturas independientes menos uno. El caso de la contribución a la incertidumbre obtenida por una evaluación tipo B es mencionado posteriormente.

El número de grados de libertad efectivos de la incertidumbre estándar v_{eff} se calcula como:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (19)$$

Se debe cumplir que:

$$v_{eff} \leq \sum_{i=1}^N v_i \quad (20)$$

Donde:

v_i : Es el número de grados de libertad de la contribución individual de la incertidumbre estándar.

Se define un factor de cobertura k , el cual es obtenido de la distribución *t-student*⁵ como:

$$k = t_p(v_{eff}) \quad (21)$$

Para permitir el cálculo mediante un programa de computador o una hoja de cálculo, se puede utilizar la siguiente ecuación para calcular t_p con un nivel de confianza de 95%:

$$t_p = 1,96 + \frac{2,374}{v} + \frac{2,818}{v^2} + \frac{2,547}{v^3} \quad (22)$$

Donde:

v : Es el número de grados de libertad

El error de la ecuación anterior es significativo cuando v es mayor a 2.

⁵ La Tabla 3 da los valores de t_p para cuatro niveles de confianza diferentes. Por ejemplo, con un valor de 10 grados de libertad efectivos, el valor $t_p(10)$ (y por lo tanto el factor de cobertura k_p) es 2,23 con un nivel de confianza de 0,95 (95%).

Se pueden obtener ecuaciones similares para otros niveles de confianza mediante el ajuste de sus correspondientes valores de t_p a un modelo matemático adecuado.

Entonces se proporciona un intervalo $Y = y \pm U_p$ teniendo un nivel de confianza aproximado p .

2.4.8 Grados de libertad de una contribución tipo B. La cantidad de grados de libertad de todas las contribuciones de incertidumbre estándar son indispensables para la determinación de los grados de libertad efectivos de la incertidumbre estándar combinada, según la Ecuación (19). Esto implica determinar el número de grados de libertad debido a las fuentes de incertidumbre tipo B.

Una incertidumbre tipo B común es la resolución de los instrumentos de medida. En este caso, el número de grados de libertad puede ser asumido cerca al infinito porque los límites de error de la distribución rectangular son precisamente conocidos.

Otro caso de incertidumbre tipo B común es la incertidumbre dada en los reportes de la calibración de los equipos usados para las mediciones. Si la incertidumbre dada en un reporte de calibración es expresada como una incertidumbre expandida con un cierto nivel de confianza y con un factor de cobertura fijado, su número de grados de libertad puede ser determinado de la Tabla 3, realizando el proceso inverso al establecido en la Ecuación (21).

Para realizar cálculos en un programa de computador o una hoja de cálculo, se puede utilizar la siguiente ecuación para calcular el número de grados de libertad ν de un factor de cobertura k reportado para un nivel de confianza del 95%.

$$\nu = 1 + \frac{2,392}{k - 1,96} + \frac{0,00076}{(k - 1,96)^2} \quad (23)$$

Tabla 3. Valor de t_p a partir del número de grados de libertad con 4 niveles de confianza.

Degrees of freedom	Probability			
	0.68	0.90	0.95	0.99
1	1.84	6.31	12.7	63.7
2	1.32	2.92	4.30	9.92
3	1.20	2.35	3.18	5.84
4	1.14	2.13	2.78	4.60
5	1.11	2.02	2.57	4.03
6	1.09	1.94	2.45	3.71
7	1.08	1.89	2.36	3.50
8	1.07	1.86	2.31	3.36
9	1.06	1.83	2.26	3.25
10		1.81	2.23	3.17
30		1.70	2.04	2.75
100		1.66	1.98	2.63
Infinite		1.65	1.96	2.58

Fuente:IEEE Power and Energy Society. (2013). Std 4.

Para otras incertidumbres tipo B, los grados de libertad adecuados deben ser juzgados con base en la calidad de la incertidumbre estimada como indica la Ecuación (G.3) de la GUM. Puede hacerse una evaluación subjetiva de los grados de libertad usando la siguiente ecuación, la cual es una versión modificada de la Ecuación (G.3) de la GUM:

$$v_i = \frac{5000}{(1 - C)^2} \quad (24)$$

Donde:

C: Es el porcentaje de confiabilidad de la estimación de la incertidumbre estándar.

Para otras distribuciones, dirigirse a la GUM.

Si los grados de libertad efectivos son iguales o mayores a 50, entonces no hay ningún valor práctico en la toma de medidas adicionales.

2.4.9 Pasos para el cálculo de la incertidumbre expandida. A continuación, se listan los pasos sugeridos por la norma IEEE-Std-4-2013 para la evaluación de la incertidumbre expandida, los cuales se tendrán en cuenta posteriormente para la metodología a implementar en las pruebas del LAT de la UIS:

1. Establecer el modelo de la función del mensurando con respecto a sus magnitudes de entrada si es posible, e identificar todos los factores de influencia del mensurando relevantes que no pueden ser expresados en el modelo de la función.
2. Determinar los coeficientes de sensibilidad del mensurando con respecto a sus magnitudes de entrada y factores de influencia, ya sea analítico, numérico, o método experimental.
3. Determinar las incertidumbres estándar de las magnitudes de entrada y factores de influencia, ya sea por evaluación tipo A o tipo B.
4. Calcular la incertidumbre combinada estándar del mensurando.
5. Determinar o asignar números a los grados de libertad de las incertidumbres estándar.

6. Calcular los grados de libertad efectivos de la incertidumbre combinada estándar.
7. Decidir el nivel de confianza para expresar la incertidumbre expandida. El nivel de confianza recomendado es 95%.
8. Determinar el factor de cobertura.
9. Calcular la incertidumbre expandida mediante la multiplicación de la incertidumbre combinada estándar por el factor de cobertura.

2.5 REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD

Para realizar un análisis efectivo de los resultados es importante tener en cuenta las condiciones de repetibilidad y reproducibilidad listadas en la GUM:

Las condiciones de repetibilidad comprenden:

El mismo procedimiento de medida

El mismo observador

El mismo instrumento de medida, utilizado en las mismas condiciones

El mismo lugar

Repetición durante un corto periodo de tiempo

En cuanto a la reproducibilidad, se trata de un grado de concordancia de los resultados de las mediciones del mismo mensurando bajo diferentes condiciones de medida, que comprenden:

Principio de medida

Método de medida

Observador

Instrumento de medida

Patrón de referencia

Lugar

Condiciones de utilización

Tiempo

De acuerdo a las consideraciones anteriormente mencionadas, el laboratorio permite en principio realizar los ensayos bajo condiciones de repetibilidad, sin embargo, es difícil cuantificar dicho parámetro a través de un método estándar como el análisis de varianzas en este caso, por la cantidad de datos y la variedad de los mismos.

En cuanto a la reproducibilidad, el análisis es mucho más complejo de realizar, pues requiere datos de un laboratorio análogo al presente, que se enfoque en obtener los mismos mensurandos. No obstante, los datos producto de este análisis podrían contribuir a un estudio mayor, que involucre este tema a profundidad.

2.6 FUENTES GENERALES DE INCERTIDUMBRE

Existen diversos factores que generan incertidumbre, los cuales son comunes a la mayoría de las prácticas del LAT-UIS y a las mediciones en general.

2.6.1 Incertidumbre de los equipos. En la mayoría de procesos de medición, los equipos aportan un nivel de incertidumbre considerable, y por tanto es muy importante tener las especificaciones de los equipos de los que se dispone. En este caso particular la totalidad de los equipos tiene la información suficiente para establecer este aporte de incertidumbre, que se cataloga como incertidumbre tipo B, puesto que no se debe a medios estadísticos.

2.6.2 Lectura sesgada de los instrumentos. Siempre que la evaluación o adquisición de un mensurando se dé a través de la lectura realizada por una persona, este hecho implica una incertidumbre producto de la imperfección humana. Este tipo de incertidumbre es prácticamente imposible de cuantificar y por tanto se sugiere, al igual que los errores sistemáticos, reducirlos al máximo. En el LAT-UIS las personas que toman las medidas están bajo la supervisión de una persona con conocimiento del sistema de medición y los criterios adecuados para el registro de datos.

2.6.1 Muestra no representativa del mensurando. En ocasiones es posible que la cantidad de datos que se obtienen puede no ser suficiente para realizar un análisis estadístico del mensurando, imposibilitando el obtener una expresión completa de la incertidumbre y limitando así el resultado a una incertidumbre parcial del mismo. Este problema es recurrente en las prácticas de laboratorio, debido esencialmente a la cantidad de tiempo que se le puede dedicar a los ensayos (intensidad horaria del curso) y al tiempo necesario para realizar algunas de las pruebas. Sin embargo, en las pruebas que sí permiten este análisis, se les fue evaluada la incertidumbre tipo A y se realizaron los cálculos que esto implica.

2.6.2 Valores inexactos de constantes y otros parámetros tomados de fuentes externas, utilizados en el algoritmo de tratamiento de los datos.

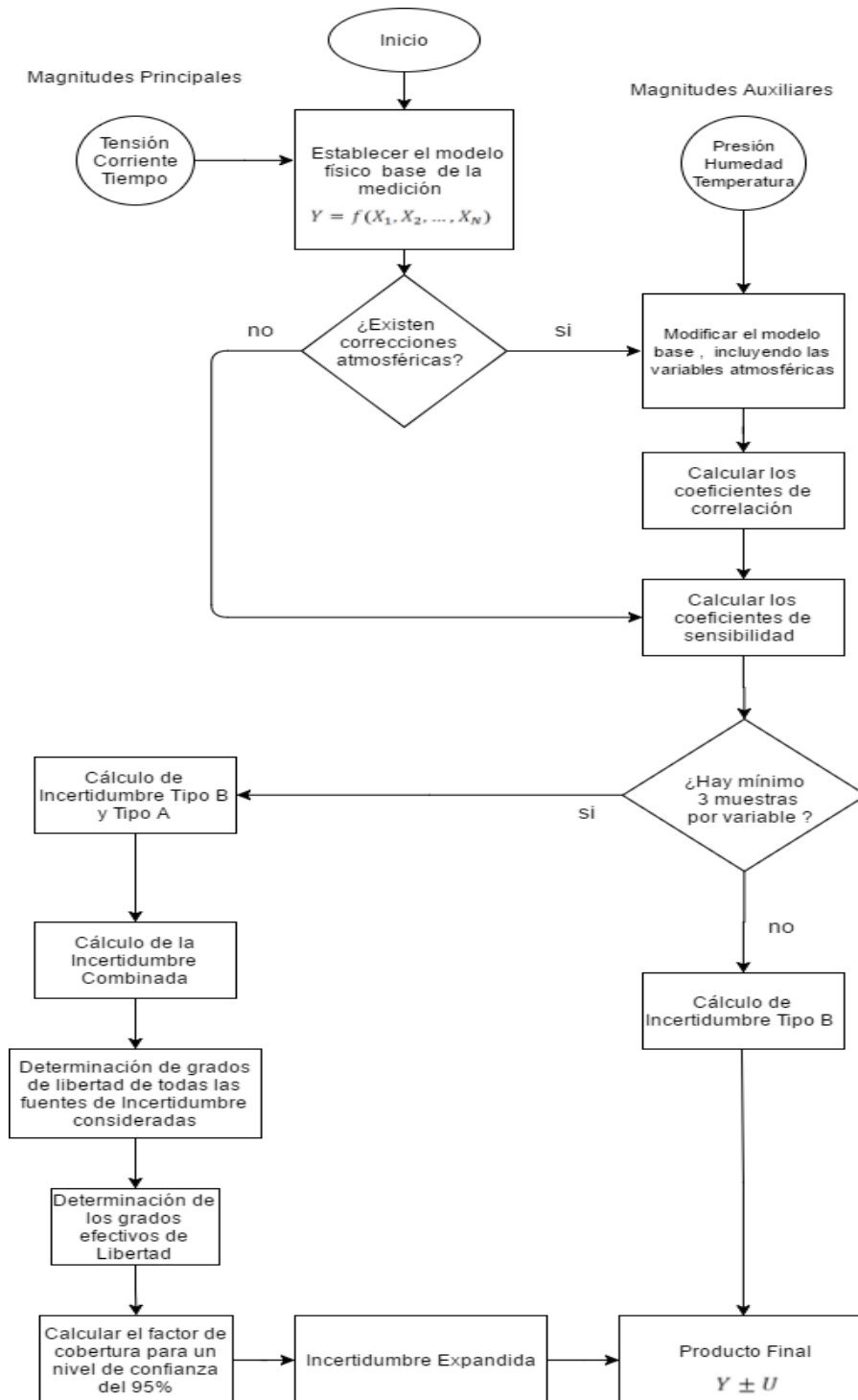
Los modelos matemáticos que se utilizan para aproximar un fenómeno físico, en ocasiones requieren del empleo de constantes que no se pueden calcular con suficiente exactitud y más aún, no es sencillo evaluar la incertidumbre que generan en el mensurando. Las medidas de tensión del laboratorio se obtienen a través de dos divisores, uno capacitivo y otro resistivo, dependiendo del caso. Cada uno de estos tiene una relación dada, relación que después de varios años de uso puede no conservar su valor original. A pesar de esto los intentos por verificar esta relación aún no han arrojado conclusiones concretas; Sin embargo, los resultados de los

ensayos actuales todavía guardan consistencia con los registros históricos, y por lo tanto para efectos de este análisis se mantuvieron las relaciones.

3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA REALIZAR LAS PRÁCTICAS EN EL LAT-UIS

Cada una de las prácticas realizadas en el LAT-UIS tiene sus propias particularidades, por el tipo de prueba aplicada (pruebas en alterna o de impulso) o bien sea por el método de medición que se emplea para registrar los datos en cada prueba, que puede ser de medida directa o corresponder a algún modelo físico asociado, lo cual implica que el procedimiento para evaluar la incertidumbre varía dependiendo de las condiciones de cada prueba, aunque el método de la evaluación de la incertidumbre en general se conserva. La Figura 12 muestra el diagrama de flujo con las etapas para evaluar la incertidumbre en los procesos de medición que se realizan en el laboratorio, por otra parte, la Tabla 4 presenta un resumen con información de las prácticas que se realizan y los equipos que se utilizan.

Figura 12. Diagrama de flujo propuesto para la evaluación de la Incertidumbre en el LAT-UIS.



Fuente: Extraído de CENAM, Schmid W., Lazos R., "Guía para estimar la incertidumbre de la medición", mayo del 2000. Y Adaptado por los Autores.

Tabla 4. Características concernientes a cada práctica.

Práctica	Modelo físico (Y)		Equipo de medida	Incertidumbre evaluada
Efecto corona en los conductores.	$V_H = 1,055V_L$ [kV]		FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II – Modo AC.	Tipo B
Determinación de la tensión de ruptura y rigidez dieléctrica.	Medida directa [kV]		CHISPÓMETRO SIEMENS CON MEDIDOR ANALOGICO.	Tipo A Tipo B
Obtención de formas de onda normalizadas. Impulso atmosférico.	Tensión pico	$V_H = 0,7205V_L$ [kV]	FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II – Modo osciloscopio.	Tipo B
	Tiempo frente	$T_1 = \frac{5}{3}(t_B - t_A)$ [μs]		
	Tiempo cola	$T_2 = t_C - t_0$ [μs]		
	Tiempo recorte	$T_3 = t_R - t_0$ [μs]		
Obtención de formas de onda normalizadas. Impulso de maniobra.	Tensión pico	$V_H = 0,7205V_L$ [kV]	FLUKE 190 - 102 SCOPEMETER. Modo osciloscopio.	Tipo B
	Tiempo frente	Medida directa [μs]		
	Tiempo cola			
Determinación de la tensión de chispa $V_{50\%}$.	$V_{H50\%} = 0,7205V_{L50\%}$ [kV]		FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II – Modo AC.	Tipo A Tipo B
Ensayo sobre DPS, prueba en AC.	Tensión de cebado, reposición	$V_H = 1,055V_L$ [kV]	FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II – Modo AC.	Tipo A Tipo B
	Corriente de drenaje	Medida directa	UNIVOLT DT 830 – Modo corriente alterna.	Tipo B
Ensayo sobre DPS, prueba de impulso.	Tensión pico	$V_H = 0,7205 * V_L$ [kV]	FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II – Modo osciloscopio.	Tipo B
	Tiempo frente	$T = t_1 - t_0$ [μs]		
	Corriente	$I = \frac{V}{R}$ [A]		
Tensión de alta a condiciones de referencia. Con correcciones atmosféricas	$(V_H)_0 = a * \frac{V_L}{K}$ [kV]		<ol style="list-style-type: none"> FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II – Modo AC u osciloscopio. LUTRON PHB 318 – para condiciones atmosféricas. 	Tipo A Tipo B

A continuación, se presentan las tablas 5 a 9 que se proponen como alternativa para realizar los diferentes cálculos requeridos en la evaluación de la incertidumbre. En el Anexo D se presenta en detalle los cálculos que se realizan para evaluar la incertidumbre, así como los programas desarrollados en Excel y Matlab con el algoritmo del modelo de correcciones atmosféricas.

Tabla 5. Toma de datos para la evaluación de la incertidumbre tipo A.

	Variables			
Muestras				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
\bar{X}				

Tabla 6. Coeficientes de sensibilidad.

Variables	$c_i = dy/dx_i$

Tabla 7. Cálculos pertinentes a los coeficientes de correlación.

Coeficientes de correlación		$2 \cdot r(x_i, x_j) \cdot u_i(y) \cdot u_j(y)$
r(t,b)		
r(t,h _r)		
r(t,V ₅₀)		
r(b,h _r)		
r(b,V ₅₀)		
r(h _r ,V ₅₀)		

Tabla 8. Cálculos pertinentes a la incertidumbre tipo A y tipo B.

Incertidumbre tipo A				
Variable	s	$u(x_i)$	$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$	$u_i^2(y)$
Incertidumbre Tipo B Exactitud				
Variable	δ	$u(\delta_i)$	$u_i \delta(y) = c_i \cdot u(\delta_i)$	$u_i^2 \delta(y)$
Incertidumbre Tipo B Resolución				
Variable	r	$u(r_i)$	$u_{ir}(y) = c_i \cdot u(r_i)$	$u_{i2r}(y)$

Tabla 9. Resultados finales de la evaluación de incertidumbre.

Incertidumbres		Factor de cobertura		Expresión del mensurando	
u_{TA}		v_{eff}		$y \bar{x}_i$	
u_{TB}		k		U	
u_C				$U/y \bar{x}_i$ [%]	
				$y \bar{x}_i \pm U$	

4. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

A continuación, se presentan algunos ejemplos de aplicación de la metodología planteada para la evaluación de la incertidumbre con sus respectivos resultados. El desarrollo de cada uno de estos ejemplos se presenta con mayor o menor detalle dependiendo de qué tan representativo sea respecto a las categorías de medición realizadas en el laboratorio, que en general se pueden clasificar en:

Medida de Tensión AC con Tanque (fuente).

Medida de Tensión AC con chispómetro.

Medida de Tensión de Impulso (GIV).

Medida de corriente (Impulso y AC).

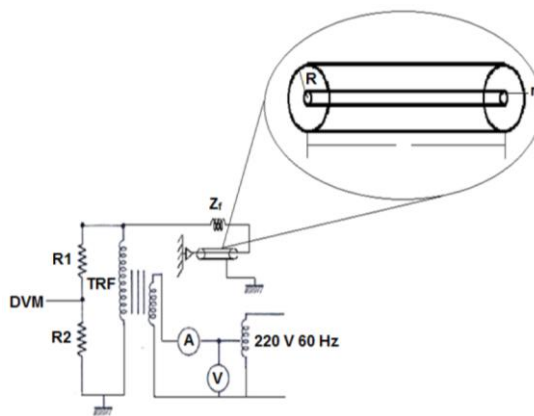
Las tablas informativas de las especificaciones de los equipos de laboratorio, así como las tablas de resultados parciales de cada una de las prácticas, se encuentran en los Anexos A y B, respectivamente.

En el Capítulo 5 se realizará un análisis de todos los resultados.

4.1 MEDICIÓN DE LA TENSIÓN POR EFECTO CORONA

En el momento que se energiza una línea de transmisión de energía eléctrica, se producen gradientes de potencial en su superficie, que al momento de sobrepasar ciertos niveles de tensión produce ionización en el aire circulante, a este fenómeno se le conoce como efecto corona.

Figura 13. Esquema para la medición del efecto corona.



Fuente: RUGELES, J., & CHACÓN, J. C. (s.f.). *Laboratorio de Alta Tensión Manual de Prácticas*. UIS.

Para la observación del efecto corona en el LAT-UIS se dispone de una estructura, una configuración coaxial (ver Figura 13), que consta de un conductor central de 1,26 cm de radio, una jaula cilíndrica de 50 cm de radio y 1,5 m de longitud.

Para la generación del efecto corona, la configuración disponible en el LAT-UIS es sometida a varios niveles de tensión, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 kV, calculados a partir del gradiente de Peek. Los niveles de tensión se leen en un voltmetro por el lado de baja tensión del divisor de tensión resistivo, R2, con relación de 1055/1, como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Niveles de tensión del divisor resistivo en alta y baja.

Tensión de alta [kV]	50	60	70	80	90	100
Tensión de baja [V]	47,4	56,9	66,4	75,8	85,3	94,8

Para obtener los niveles tensión establecidos con los cuales se aprecia el efecto corona, se debe aumentar la tensión del auto-transformador e identificar el valor de tensión que muestra el voltmetro (tensión de baja). Cabe resaltar que precisar un valor de baja tensión no es fácil debido a los taps del auto-transformador, ni práctico para efectos del cálculo de la incertidumbre de la medida.

Al medir un solo valor de tensión correspondiente para cada nivel de tensión en el lado de baja tensión, implica que no se puede estimar la incertidumbre tipo A y, por ende, el análisis de incertidumbre se limita a la evaluación de la incertidumbre tipo B con los valores máximos de resolución y exactitud.

Cálculo de la incertidumbre Tipo B:

Para evaluar la incertidumbre tipo B, se recopilan las medidas correspondientes a cada nivel de tensión, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Tensión medida en lado de baja para cada nivel de tensión correspondiente al lado de alta

Prueba	50 kV	60 kV	70 kV	80 kV	90 kV	100 kV
1	47,6	56,9	66,6	76,1	85,4	95,1
2	47,3	57,2	66,1	75,9	85,5	94,6
3	47,4	56,5	66,7	76	85,1	94,9
4	47,2	56,4	66,5	75,8	85,9	94,3

Para el desarrollo del ejemplo se considera el primer valor de tensión medido en el lado de baja de la prueba realizada para el nivel de tensión por el lado de alta de 50 [kV], es decir, 47,6 [V].

Para obtener los coeficientes de sensibilidad, es necesario establecer el modelo físico, a partir del cual se obtiene la expresión:

$$V_H = 1,055V_L \text{ [kV]} \quad (25)$$

Donde:

V_H : Es la tensión de alta tensión calculada, en [kV].

V_L : Es la tensión de baja medida, en [V].

Se calcula el coeficiente de sensibilidad de acuerdo a la Ecuación (13):

$$c_1 = \left. \frac{\partial V_H}{\partial V_L} \right|_{\bar{V}_L} = 1,055 \left[\frac{kV}{V} \right]$$

c_1 : Es el coeficiente de sensibilidad promedio relacionado al modelo físico, evaluado en su valor promedio.

Una vez obtenidas las especificaciones del equipo de medida de la Tabla A1 del Anexo A se calcula la incertidumbre debida a la resolución y a la exactitud del equipo. La resolución se obtiene del dígito menos significativo en la recopilación de las muestras y la exactitud de las especificaciones del equipo.

$$\text{Resolución} = 0,1 \text{ [V]}$$

$$\text{Exactitud} = \pm(1\% + 10 \text{ cuentas})$$

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \left(\frac{1}{100} * V_L + 10 \cdot \text{Resolución} \right) \\ &= \left(\frac{47,6}{100} + 10 \cdot 0,1 \right) = 1,476 \text{ [V]}\end{aligned}$$

Al tener una única muestra de estudio no existe ningún tipo de distribución, por lo tanto, se conserva la incertidumbre de la exactitud y de la resolución del equipo.

$$u(\delta_1) = \delta_1 = 1,476 \text{ [V]}$$

$$u(r_1) = \text{Resolución} = 0,1 \text{ [V]}$$

Multiplicar incertidumbres del equipo por los coeficientes de sensibilidad.

$$u_1(y) = c_1 \cdot (\delta_1) = 1,055 \cdot 1,476 = 1,55718 \text{ [kV]}$$

$$u_2(y) = c_1 \cdot (r_1) = 1,055 \cdot 0,1 = 0,1055 \text{ [kV]}$$

Calcular el valor de la incertidumbre tipo B, realizando una derivación de la Ecuación (12)

$$u_{TB} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i u(\delta_i)]^2 + [c_i u(r_i)]^2} \quad (26)$$

$$u_{TB} = \sqrt{1,55718^2 + 0,1055^2} = 1,56075 \text{ [kV]}$$

Expresión del mensurando

El resultado del mensurando para el primer nivel de tensión efectuado en la práctica de laboratorio con su incertidumbre expandida se obtiene evaluando el valor medio de las variables que inciden en el modelo físico y dicho valor de incertidumbre.

$$V_H = 1,055 \cdot V_L \pm U \text{ [kV]}$$

$$V_H = 1,055 \cdot 47,6 \pm 1,5607 \text{ [kV]}$$

$$V_H = 50,218 \pm 1,5607 \text{ [kV]}$$

La expresión final de incertidumbre de la medida de alta tensión es la siguiente:

$$V_H = 50,2 \pm 1,6 \text{ [kV]}$$

El resultado de las pruebas de efecto corona con todos los niveles de tensión empleados para todas las pruebas se encuentran en la Tabla B1 del Anexo B.

Los resultados del mensurando se muestran en la Tabla 12:

Tabla 12. Expresión del mensurando para cada nivel de tensión de prueba.

		Niveles de tensión de la prueba [kV]					
Prueba		50	60	70	80	90	100
$V_H \pm U$ [kV]	1	50,2 ± 1,6	60,0 ± 1,7	70,3 ± 1,8	80,3 ± 1,9	90,1 ± 2,0	100,3 ± 2,1
	2	49,9 ± 1,6	60,3 ± 1,7	69,7 ± 1,8	80,1 ± 1,9	90,2 ± 2,0	99,8 ± 2,1
	3	50,0 ± 1,6	59,6 ± 1,7	70,4 ± 1,8	80,2 ± 1,9	89,8 ± 2,0	100,1 ± 2,1
	4	49,8 ± 1,6	59,5 ± 1,7	70,2 ± 1,8	80,0 ± 1,9	90,6 ± 2,0	99,5 ± 2,1

4.2 DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DE RUPTURA DIELECTRICA EN ACEITES AISLANTES

En esta práctica se evalúa la tensión de ruptura dieléctrica de una muestra de aceite mediante un procedimiento estándar establecido en la norma NTC 2975, utilizando un chispómetro con voltmetro analógico incorporado que a su vez permite una rampa de crecimiento de la tensión para la prueba. La cantidad de muestras a utilizar depende de un criterio de consistencia estadístico que de cumplirse en las primeras 5 medidas (ignorando siempre la primera medida) fijará la cantidad en ese valor, de lo contrario se tomarán 5 medidas más y este será el número de muestras a considerar.

A continuación, se presenta un ejemplo del análisis de incertidumbre utilizando los valores correspondientes a la tensión de ruptura (para el cálculo de la incertidumbre de la rigidez se procede de la misma manera).

Cálculo de la incertidumbre tipo A:

Se recopilan las muestras de la tensión de ruptura y rigidez dieléctrica (ver Tabla 13).

Tabla 13. Muestras de tensión de ruptura y rigidez dieléctrica.

Muestra	Tensión de Ruptura [kV]	Rigidez [kV/cm]
1	22	90
2	22	90
3	20	80
4	18	75
5	21	85

Se obtiene el valor promedio de las mediciones realizadas y, la desviación estándar a partir de las muestras de tensión, de acuerdo a las ecuaciones (9) y (10)

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n V_k = \frac{1}{5} (22 + 22 + 20 + 18 + 21) = 20,6 \text{ [kV]}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (V_k - \bar{V})^2} = 1,6733 \text{ [kV]}$$

Se calcula el valor de la incertidumbre tipo A de acuerdo a la Ecuación (11) como:

$$u_1(y) = u(x_1) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{1,6733}{\sqrt{5}} = 0,7483 \text{ [kV]}$$

Al no existir un modelo físico que rijan el mensurando, las medidas de tensión y de rigidez se toman directamente, por lo tanto, el valor de la incertidumbre tipo A es:

$$u_{TA} = u(x_1) = 0,7483 \text{ [kV]}$$

Cálculo de la incertidumbre tipo B:

El proceso del cálculo de la incertidumbre tipo B considera las especificaciones del equipo de medida de tensión analógico.

Las especificaciones del equipo de medida se obtienen en la Tabla A2 del Anexo A.

La resolución y de la exactitud del equipo son:

$$\text{Resolución} = 2 \text{ [kV]}$$

$$\text{Exactitud} = \pm 1,5\%$$

$$\delta_1 = \frac{1,5}{100} \bar{V} = \frac{1,5}{100} \cdot 20,6 = 0,309 \text{ [kV]}$$

La incertidumbre de la exactitud del equipo es de distribución rectangular o uniforme.

$$u_2(y) = u(\delta_1) = \frac{\delta_1}{\sqrt{3}} = \frac{0,309}{\sqrt{3}} = 0,1784 \text{ [kV]}$$

$$u_3(y) = u(r_1) = \frac{\text{Resolución}}{\sqrt{12}} = \frac{2}{\sqrt{12}} = 0,57735 \text{ [kV]}$$

Para el cálculo de la incertidumbre tipo B se usa la Ecuación (26), teniendo en cuenta que los coeficientes de sensibilidad se asumen con valor de 1.

$$u_{TB} = \sqrt{0,1784^2 + 0,57735^2} = 0,60428 \text{ [kV]}$$

Cálculo de la incertidumbre combinada:

La incertidumbre combinada se obtiene a partir de la suma en cuadratura de la incertidumbre tipo A y la incertidumbre tipo B (de acuerdo a la Ecuación (12)):

$$u_C = \sqrt{u_{TA}^2 + u_{TB}^2} \quad (27)$$

$$u_C = \sqrt{0,7483^2 + 0,60428^2} = 0,9618 \text{ [kV]}$$

Cálculo de la incertidumbre expandida:

El proceso de cálculo de la incertidumbre expandida debe tener en cuenta el análisis estadístico de la incertidumbre tipo A y tipo B.

Para determinar el valor de los grados de libertad⁶ hay que considerar los grados de libertad de cada uno de los procesos de incertidumbre tipo A y tipo B de la siguiente forma:

$$v_1 = n - 1 = 5 - 1 = 4$$

$$v_2 = 100$$

$$v_3 = 1000$$

v_1 : Es el grado de libertad para datos estadísticos.

v_2 : Es el grado de libertad para la exactitud del equipo de medida.

v_3 : Es el grado de libertad para la resolución del equipo de medida.

El valor de los grados de libertad efectivos, de acuerdo a la Ecuación (19) es igual a:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} = \frac{0,9618^4}{\frac{0,7483^4}{4} + \frac{0,1784^4}{100} + \frac{0,57735^4}{1000}} = 10,9005$$

⁶ Los grados de libertad de los equipos de medida se conservan para todas las prácticas y los grados de libertad para datos estadísticos están sujetos al número de muestras.

Encontrar el factor de cobertura k a partir de la distribución *t-student* de dos colas, con base en el valor de los grados de libertad efectivos y un nivel de confianza del 95%, como se explica en el numeral 0 :

$$k = t_p(v_{eff}) = 2,2034$$

Calcular el valor de la incertidumbre expandida, de acuerdo a la ecuación (18).

$$U = u_c(y) = 2,2034 \cdot 0,9618 = 2,119 \text{ [kV]}$$

Expresión del mensurando

El resultado del mensurando en la práctica de laboratorio es:

$$V_H = \bar{V}_L \pm U \text{ [kV]}$$

$$V_H = 20,6 \pm 2,119 \text{ [kV]}$$

La expresión final de incertidumbre de la medida de alta tensión es la siguiente:

$$V_H = 20 \pm 2 \text{ [kV]}$$

Los resultados parciales de la prueba de tensión de ruptura y rigidez dieléctrica para todas las pruebas se muestran en las tablas B2 y B3 del Anexo B.

La expresión del mensurando final en las diferentes pruebas realizadas se presenta en la Tabla 14:

Tabla 14. Expresión del mensurando para las pruebas de tensión de ruptura y rigidez dieléctrica.

	Tensión de Ruptura[kV]	Rigidez [kV/cm]
Prueba 1	20 ± 2	85 ± 10
Prueba 2	24 ± 4	95 ± 15
Prueba 3	20 ± 2	80 ± 10
Prueba 4	20 ± 2	85 ± 10

4.3 OBTENCIÓN DE FORMAS DE ONDA NORMALIZADA

Las especificaciones del Generador de Impulsos (GI) del LAT-UIS, como del divisor capacitivo usado para la medición del proceso se encuentran en las tablas A3 y A4 del Anexo A.

Para calcular los valores de tensión por etapa que se ingresan en la consola del GI, se toma una eficiencia del 95% para impulso atmosférico y 90% para impulso maniobra.

Se tienen en cuenta medidas de tensión y tiempo.

Al no poder determinar el tiempo de frente y de cola en una misma señal, por cuestiones de implementación, se hallan dichos tiempos en señales distintas.

El resultado final que se muestra para el cálculo de la incertidumbre comprende a nivel general la tensión pico de todas las ondas y las medidas de tiempo correspondientes (frente, cola o recorte).

Los valores de tiempo y tensión se obtuvieron mediante un método gráfico. Estos valores de tensión y tiempo deben ser aproximados a un múltiplo de la resolución del equipo con el que fueron dibujadas sus señales, para ello hay que conocer las características de cada dispositivo en modo osciloscopio, como lo son la escala, la

exactitud y la resolución en los ejes de tensión y tiempo, todo esto para efectos del cálculo de la incertidumbre.

Los datos de escala y resolución se muestran en la Tabla 15, extraídos de la Tabla A5 del Anexo A.

Tabla 15. Escala y resolución de los equipos de medida respecto a las variables de interés para los impulsos atmosféricos y de maniobra.

Impulso atmosférico		
	Escala	Resolución
Tiempo frente [ns]	500	20
Tiempo cola [μ s]	10	0,4
Tiempo recorte [μ s]	1	0,04
Tensión pico [V]	20	0,8
Impulso de maniobra		
	Escala	Resolución
Tiempo frente [μ s]	40	1,6
Tiempo cola [μ s]	400	16
Tensión pico [V]	20	0,8

Para el impulso atmosférico se calcula la incertidumbre para el tiempo de frente, tiempo de cola y tiempo de recorte y para el impulso de maniobra se calcula incertidumbre para el tiempo de frente y tiempo de cola. Para todos se calcula incertidumbre de tensión pico. Es un cálculo de incertidumbre tipo B únicamente.

El proceso para hallar la incertidumbre de la tensión es el mismo que se empleó para la práctica del efecto corona, con un modelo físico y modo de equipo diferentes:

Modelo físico:

$$V_H = 0,7205 V_L [kV] \quad (28)$$

Donde:

V_H : Es la tensión de alta calculada, en [kV].

V_L : Es la tensión de baja, medida en [V].

Se calcula el coeficiente de sensibilidad, de acuerdo a la Ecuación (13):

$$c_1 = \left. \frac{\partial V_H}{\partial V_L} \right|_{V_L} = 0,7205 \left[\frac{kV}{V} \right]$$

Especificaciones de los equipos de medida para medir tensión.

$$Escala = 20 \left[\frac{V}{div} \right]$$

$$Resolución_{105} = \frac{Escala}{Pixeles} = \frac{20}{25} = 0,8 [V]$$

$$Resolución_{190-102} = 0,04Escala = 0,04 \cdot 20 = 0,8 [V]$$

$$Exactitud_{105} = \pm(2\% + 1 \text{ pixel})$$

$$Exactitud_{190-102} = \pm(2,1\% + 0,04 \text{ rango/div})$$

$$\delta_{1105} = \left(\frac{2V_L}{100} + \text{Resolución} \right)$$

$$\delta_{1190-102} = \left(\frac{2,1V_L}{100} + \text{Resolución} \right)$$

Al ser la escala de tensión única para todas las formas de onda de impulsos, se puede concluir que la resolución de los dos equipos es la misma.

Los tiempos de frente, cola y recorte, son medidas indirectas que se toman con base en la señal mostrada por el osciloscopio, por lo tanto, cada tiempo viene descrito por un modelo que se muestra posteriormente en el desarrollo del cálculo de incertidumbre.

Los tiempos de origen virtual⁷ se hallaron de tal manera que cumplan con la igualdad que propone la norma:

$$T' = 0,3T_1 = 0,5T \quad (29)$$

$$T' = t_A - t_0 \quad (30)$$

$$T = (t_B - t_0) - (t_A - t_0) = t_B - t_A \quad (31)$$

Donde:

t_0 : Es el tiempo entre el origen virtual y el real.

t_A : Es el tiempo al 30% de la tensión pico.

t_B : Es el tiempo al 90% de la tensión pico.

t_C : Es el tiempo al 50% de la tensión pico en la cola de la onda.

t_R : Es el tiempo de recorte, que es justo cuando se empieza a deformar la onda.

⁷ Estos tiempos vienen dados de la Figura 2

Cálculo de la incertidumbre para el tiempo de frente:

Hacer una recopilación de las medidas de tiempos correspondientes:

En la Figura 14 se muestra la obtención de los datos registrados⁸ en la Tabla 16.

Figura 14. Grafica de impulso atmosférico para tiempo de frente.

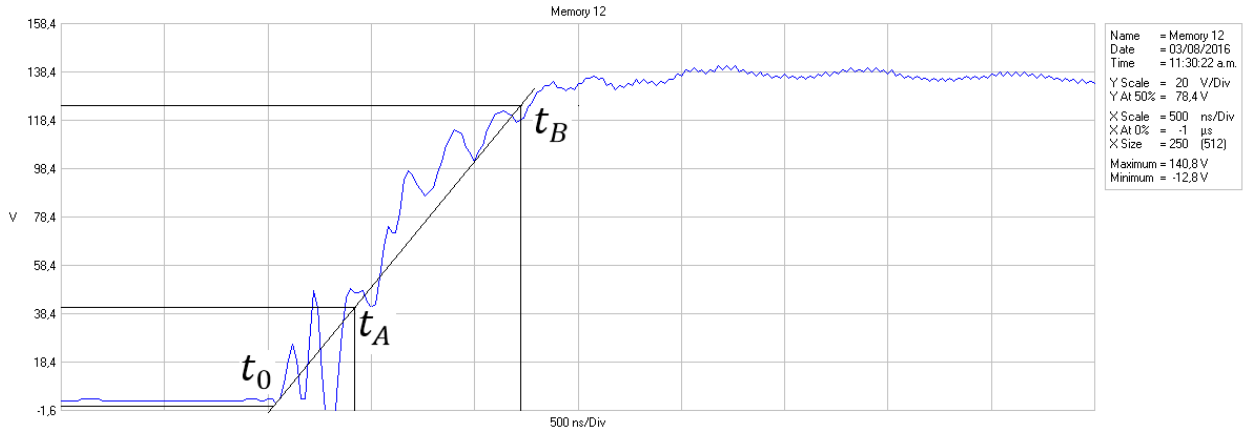


Tabla 16. Valores de tiempo hallados en la gráfica y aproximado a la resolución de medida.

Tiempo desde origen [ns]	
t_A (0,3Vp)	420
t_B (0,9Vp)	1220
Origen virtual	20

Calcular los coeficientes de sensibilidad con base en el modelo físico:

⁸ Se recomienda registrar los datos de tiempo de acuerdo a la escala en que se mide (para el tratamiento de datos). Sin embargo, los resultados finales deben expresarse en microsegundos [μs], de acuerdo a la norma IEEE Std - 4.

$$T_1 = \frac{5}{3}(t_B - t_A) \quad (32)$$

Donde:

T_1 : Es el tiempo de frente, en [ns].

De acuerdo a la Ecuación (13), los coeficientes de sensibilidad son:

$$c_1 = \left. \frac{\partial T_1}{\partial t_A} \right|_{t_A, t_B} = -\frac{5}{3}$$

$$c_2 = \left. \frac{\partial T_1}{\partial t_B} \right|_{t_A, t_B} = \frac{5}{3}$$

Calcular incertidumbre de la resolución y de la exactitud del equipo con base en la resolución dada y las especificaciones del equipo.

$$Resolución = \frac{Escala}{25} = \frac{500}{25} = 20 [ns]$$

$$Exactitud = \pm(0,1\% + 1 \text{ pixel})$$

$$\delta_1 = \left(\frac{0,1t_A}{100} + Resolución \right) = \left(\frac{0,1}{100} \cdot 420 + 20 \right) = 20,42 [ns]$$

$$\delta_2 = \left(\frac{0,1t_B}{100} + Resolución \right) = \left(\frac{0,1}{100} \cdot 1220 + 20 \right) = 21,22 [ns]$$

Multiplicar incertidumbres del equipo por los coeficientes de sensibilidad.

$$u_1(y) = c_1 \cdot (\delta_1) = -\frac{5}{3} \cdot 20,42 = -34,0333 \text{ [ns]}$$

$$u_2(y) = c_1 \cdot (r_1) = -\frac{5}{3} \cdot 20 = -33,3333 \text{ [ns]}$$

$$u_3(y) = c_2 \cdot (\delta_2) = \frac{5}{3} \cdot 21,22 = 35,3666 \text{ [ns]}$$

$$u_4(y) = c_2 \cdot (r_2) = \frac{5}{3} \cdot 20 = 33,3333 \text{ [ns]}$$

El valor de la incertidumbre tipo B, se obtiene de acuerdo a la Ecuación (12):

$$u_{TB} = \sqrt{(-34,0333)^2 + (-33,3333)^2 + 35,3666^2 + 33,3333^2} = 68,0535 \text{ [ns]}$$

Cálculo de la incertidumbre para el tiempo de cola.

El proceso para el cálculo del tiempo de cola es similar al tiempo de frente con la excepción de los cambios en el modelo físico y la resolución.

Modelo físico y resolución del equipo.

$$T_2 = t_c - t_0 \text{ [}\mu\text{s]} \quad (33)$$

Siendo:

T_2 : Es el tiempo de cola, en [μ s].

Los coeficientes de sensibilidad son:

$$c_1 = \left. \frac{\partial T_2}{\partial t_0} \right|_{t_0, t_C} = -1$$

$$c_2 = \left. \frac{\partial T_2}{\partial t_C} \right|_{t_0, t_C} = 1$$

$$\text{Resolución} = 0,4 \text{ } [\mu\text{s}]$$

Cálculo de la incertidumbre para el tiempo de recorte:

Modelo físico:

$$T_3 = t_R - t_0 \text{ } [\mu\text{s}] \tag{34}$$

Donde:

T_3 : Es el tiempo de recorte, en $[\mu\text{s}]$.

$$c_1 = \left. \frac{\partial T_3}{\partial t_0} \right|_{t_0, t_R} = -1$$

$$c_2 = \left. \frac{\partial T_3}{\partial t_R} \right|_{t_0, t_R} = 1$$

La resolución del equipo es:

$$Resolución = 0,04 [\mu s]$$

Cálculo de la incertidumbre para el impulso de maniobra

Las lecturas para los tiempos del impulso de maniobra se toman de forma directa, no es necesario ningún modelo físico y los cálculos se simplifican. La diferencia radica en el cambio del equipo de medida.

Cálculo de la incertidumbre para el tiempo de frente.

El cambio de equipo implica una nueva exactitud, pero la resolución del equipo de medida utilizado para impulso de maniobra es igual al que se utilizó en impulso atmosférico.

$$Resolución = 0,04 Escala = 0,04 \cdot 40 = 1,6 [\mu s]$$

$$Exactitud = \pm(100 \text{ ppm} + 0,04 \text{ div})$$

$$\delta_1 = (100 \cdot 10^{-6} T_1 + Resolución)$$

Cálculo de la incertidumbre para el tiempo de cola.

$$Resolución = 16 [\mu s]$$

Los Resultados parciales de cada una de las pruebas de impulso atmosférico e impulso maniobra se encuentran en las tablas B4 a B8 del Anexo B.

Los resultados totales de los mensurandos se muestran en las tablas 17 a 21.

Tabla 17. Resultados de mensurando de tiempo de frente para impulso atmosférico.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Alta [kV]			
$V_H \pm U$ [kV]	$100 \pm 2,4$	$101,6 \pm 2,4$	$100 \pm 2,4$	$100 \pm 2,4$
	Tiempo de Frente [μ s]			
$T_1 \pm U$ [μ s]	$1,34 \pm 0,06$	$1,28 \pm 0,06$	$1,34 \pm 0,06$	$1,34 \pm 0,06$

Tabla 18. Resultados de mensurando de tiempo de cola para impulso atmosférico.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Alta [kV]			
$V_H \pm U$ [kV]	$98,4 \pm 2,4$	$100 \pm 2,4$	$97,6 \pm 2,4$	$100,8 \pm 2,4$
	Tiempo de Cola [μ s]			
$T_2 \pm U$ [μ s]	$49,2 \pm 0,8$	$50,8 \pm 0,8$	$51,2 \pm 0,8$	$50,0 \pm 0,8$

Tabla 19. Resultados de mensurando de tiempo de recorte para impulso atmosférico.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Alta [kV]			
$V_H \pm U$ [kV]	$100 \pm 2,4$	$100,8 \pm 2,4$	$98,4 \pm 2,4$	$100 \pm 2,4$
	Tiempo de Recorte [μ s]			
$T_3 \pm U$ [μ s]	$3,72 \pm 0,08$	$3,60 \pm 0,08$	$3,72 \pm 0,08$	$4,2 \pm 0,08$

Tabla 20. Resultados de mensurando de tiempo de frente para impulso maniobra.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Alta [kV]			
$V_H \pm U$ [kV]	$98,4 \pm 2,4$	$93,6 \pm 2,4$	$100,8 \pm 2,4$	$100 \pm 2,4$
	Tiempo de Frente [μ s]			
$T_1 \pm U$ [μ s]	$204,8 \pm 1,6$	$200 \pm 1,6$	$201,6 \pm 1,6$	$203,2 \pm 1,6$

Tabla 21. Resultados de mensurando de tiempo de cola para impulso maniobra.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Alta [kV]			
$V_H \pm U$ [kV]	98,4 \pm 2,4	98,4 \pm 2,4	101,6 \pm 2,4	100 \pm 2,4
	Tiempo de Cola [μ s]			
$T_2 \pm U$ [μ s]	2224 \pm 16	2208 \pm 16	2208 \pm 16	2208 \pm 16

4.4 DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DE CHISPA $V_{50\%}$

De acuerdo al método propuesto en la norma IEC 60.2, para hallar la tensión de ruptura $V_{50\%}$ se requiere de un sencillo procedimiento estadístico en el que se involucra un promedio ponderado de las tensiones por nivel, con el número de eventos (chispa o no chispa) respectivo. Para esta práctica se tomaron diez eventos como muestras de estudio. En la Tabla 22 se muestran los datos de las pruebas para la determinación de la tensión de chispa $V_{50\%}$ mediante el método *up and down* donde X representa los flameos y O representa los no flameos.

Tabla 22. Recopilación de datos de la prueba *up and down*

kV/Etapa	Prueba 1 Tensión baja [V]	Nivel			
		1	2	3	4
24,5		O			
24,9		O			
25,3	134	O	O2		
25,7	136	X1	O3	O7	O9
26,1	138	O4	X6	X8	X10
26,5	140	X5			

Luego de organizados los datos, se les realiza el procedimiento mencionado, como se muestra en la Tabla 23:

Tabla 23. Tratamiento estadístico de los datos

Etapas	O	X	Total eventos (n)	V·n [V]	V·n [kV]
1	1	0	1	134	96,547
2	3	1	4	544	391,952
3	1	3	4	552	397,716
4	0	1	1	140	100,87
TOTAL	5	5	10	137	98,7085

Posteriormente se hace una recopilación de muestras de la tensión en el lado de baja del divisor capacitivo, que corresponde a los siguientes valores:

134	136	136	136	136	138	138	138	138	140
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Para calcular la incertidumbre tipo A se evalúa el promedio, la desviación estándar y la incertidumbre estándar a partir de las diez muestras de tensión, de acuerdo a las ecuaciones (9), (10) y (11).

$$\bar{V}_L = 137 [V]$$

$$s = 1,69967 [V]$$

$$u(x_1) = \frac{s}{\sqrt{n}} = 0,53748 [V]$$

Se calculan los coeficientes de sensibilidad considerando el modelo físico:

$$V_{H50\%} = 0,7205V_{L50\%} [kV]$$

Donde:

$V_{H50\%}$: Es la tensión de chispa en alta calculada, en [kV].

$V_{L50\%}$: Es la tensión de chispa en baja medida, en [V].

De acuerdo a la Ecuación (13):

$$c_1 = 0,7205 \left[\frac{kV}{V} \right]$$

Luego se multiplica la incertidumbre estándar por los coeficientes de sensibilidad.

$$u_1(y) = c_1 \cdot u(x_1) = 0,7205 \cdot 0,53748 = 0,38725 [kV]$$

El valor de la incertidumbre tipo A, de acuerdo a la Ecuación (12) es:

$$u_{TA} = 0,38725 [kV]$$

La incertidumbre tipo B se calcula de manera análoga al ejemplo 4.2, con el mismo equipo de medida, obteniendo el siguiente resultado:

$$u_{TB} = 0,98609 [kV]$$

Calcular de la incertidumbre combinada de acuerdo a la Ecuación (24):

$$u_C = \sqrt{u_{TA}^2 + u_{TB}^2} = 1,0594 [kV]$$

El valor de los grados de libertad efectivos, de acuerdo a la nota 6 del ejemplo 4.2 y la ecuación (19), es:

$$v_{eff} = 105,4488$$

Se obtiene el factor de cobertura k a partir de la distribución *t-student* de dos colas y se calcula el valor de la incertidumbre expandida.

$$k = 1,9827$$

$$U = k \cdot u_c(y) = 2,1005 [kV]$$

Finalmente, la expresión del mensurando es:

$$V_{H50} = 0,7205 \cdot \overline{V_{L50}} + U [kV]$$

$$V_H = 98,7085 \pm 2,1 [kV]$$

La Tabla 24 presenta los resultados de la determinación de tensión de chispa:

Tabla 24. Resultados del mensurando de tensión de chispa

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
$V_H \pm U [kV]$	$98,7 \pm 2,1$	$98,1 \pm 2,0$	$100,6 \pm 2,2$	$101,2 \pm 2,1$

Los resultados parciales se encuentran en la Tabla B9 del Anexo B.

4.5 TENSIÓN DE CHISPA $V_{50\%}$ CON CORRECCIONES ATMOSFÉRICAS

El proceso para hallar la incertidumbre de la tensión de chispa o de ruptura con correcciones atmosféricas, es el más complejo en comparación a las diferentes prácticas realizadas en el Laboratorio de Alta Tensión. Este proceso contiene en su desarrollo todos los aspectos descritos en la teoría de incertidumbre, debido a las características de la prueba y a las variables (temperatura, presión, humedad y tensión de chispa) que se implementan en la misma.

El modelo físico de esta práctica fue seleccionado de acuerdo al método utilizado para realizar las correcciones, que en esta práctica corresponde al *método 2*, el cual es utilizado para objetos de prueba con una distancia de descarga menor a un metro, como es el caso del aislador al que se le aplicó la prueba.

Para el cálculo de la incertidumbre de la tensión de chispa corregida a condiciones de referencia se procedió de la siguiente manera:

Cálculo de la incertidumbre Tipo A

Esta práctica requiere de más de una variable, por lo tanto, el análisis de la incertidumbre tipo A necesita la inclusión de datos de todas las variables que inciden en el mensurando:

La Tabla 25 muestra las medidas de temperatura, presión, humedad relativa y tensión de chispa en el lado de baja del divisor capacitivo.

Con estos datos se calcula el valor promedio, la desviación estándar y la incertidumbre estándar a partir de las diez muestras de tensión, los cuales se muestran en la Tabla 26.

Tabla 25. Muestras correspondientes a la prueba 1 de todas las variables medibles para la prueba de $V_{50\%}$.

Muestras	t [°C]	b [mmHg]	h _r [%]	V ₅₀ [V]
1	26,3	678,8	60,8	134
2	26,3	678,6	60,7	136
3	26,3	678,6	60,7	136
4	26,3	678,6	60,7	136
5	26,3	678,6	60,7	136
6	26,4	678,7	60,8	138
7	26,4	678,7	60,8	138
8	26,4	678,7	60,8	138
9	26,4	678,7	60,8	138
10	26,3	678,8	60,4	140

Tabla 26. Promedio, desviación estándar e incertidumbre estándar de todas las variables.

	t [°C]	b [mmHg]	h _r [%]	V ₅₀ [V]
\bar{X}	26,34	678,68	60,72	137
s(x)	0,05163978	0,07888106	0,12292726	1,69967317
u(x _i)	0,01632993	0,02494438	0,03887301	0,53748385

Los coeficientes de sensibilidad se obtienen con base en el modelo físico, cuya ecuación es:

$$(V_{H_{50\%}})_0 = 0,7205 * \frac{V_{L_{50\%}}}{K} [kV] \quad (35)$$

Donde:

$(V_{H50\%})_0$: Es la tensión de chispa en el lado de alta a condiciones de referencia, en [kV].

$V_{L50\%}$: Es la tensión de chispa en el lado de baja a condiciones de laboratorio, en [V].

K : Es el factor de corrección por condiciones atmosféricas, dado por las ecuaciones (1) a (7), descritas en el numeral 2.2:

$$b = 0,1333H \quad (1)$$

$$k_d = \left(\frac{p}{p_0}\right)^m \left(\frac{273 + t_0}{273 + t}\right)^n \quad (2)$$

$$k_h = k^w \quad (3)$$

$$k = 6,801942 \cdot 10^{-5}h^2 - 9,831233 \cdot 10^{-3}h + 1,098898 \quad (4)$$

$$k = 1,1811 \cdot 10^{-4}h^2 - 1,442 \cdot 10^{-2}h + 1,1435 \quad (5)$$

$$CV_{H_2O} = 3,0814 \cdot 10^{-4}t^3 + 7,4063 \cdot 10^{-3}t^2 + 0,3289t + 4,9237 \left[\frac{g}{m^3}\right] \quad (6)$$

$$h = (CV_{H_2O}) \left(\frac{h_r\%}{100}\right) \quad (7)$$

Donde

b : Es la presión barométrica (en kPa).

H : Es la altura barométrica (en mmHg).

k_d : Es el factor de corrección de densidad del aire.

k_h : Es el factor de corrección por humedad.

- m, n : Son exponentes para corrección por densidad del aire.
- w : Exponente para corrección por humedad.
- p : Es la presión atmosférica a condiciones de prueba.
- t : Es la temperatura en °C a condiciones de prueba.
- h : Es el valor de humedad absoluta a condiciones de prueba.
- $h_r\%$: Es el valor de humedad relativa a condiciones de prueba.
- CV_{H_2O} : Es el valor de vapor de agua del aire saturado para la temperatura de prueba.

Todas las ecuaciones anteriores están ajustadas para cumplir con el modelo original de la medida de tensión de chispa a condiciones de referencia, teniendo en cuenta los dispositivos disponibles en el laboratorio.

El tipo de prueba de la determinación de tensión de chispa corregida a condiciones de referencia, es una prueba de impulso atmosférico de polaridad positiva con una forma de electrodo tipo punta – placa, teniendo en cuenta la disposición del instrumento de prueba. Por lo tanto, los valores⁹ de los exponentes de los factores de correcciones atmosféricas son:

$$m = n = w = 1$$

Los coeficientes de sensibilidad fueron evaluados mediante un software debido a la complejidad del modelo. A continuación, se muestra el resultado de evaluar cada derivada parcial en los valores promedio de las medidas registradas correspondientes a cada variable:

⁹ Valores obtenidos a partir de la Tabla 1

$$c_1 = \left. \frac{\partial(V_{H50})_0}{\partial t} \right|_{\bar{x}_i} = -0,3639989 \left[\frac{kV}{^\circ C} \right]$$

$$c_2 = \left. \frac{\partial(V_{H50})_0}{\partial b} \right|_{\bar{x}_i} = -0,1610917 \left[\frac{kV}{mmHg} \right]$$

$$c_3 = \left. \frac{\partial(V_{H50})_0}{\partial h_r} \right|_{\bar{x}_i} = -0,215019 \left[\frac{kV}{h_r \%} \right]$$

$$c_4 = \left. \frac{\partial(V_{H50})_0}{\partial V_{L50}} \right|_{\bar{x}_i} = 0,79802697 \left[\frac{kV}{V} \right]$$

La Tabla 27 muestra los cálculos pertinentes para evaluar la incertidumbre tipo A.

Tabla 27. Cálculos pertinentes a la incertidumbre tipo A.

Variable	$u(x_i)$	$c_i = d(V_{H50})_0 / dx_i$	$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$	$u_i^2(y)$
t [°C]	0,01632993	-0,3639989	-0,0059441	3,5332E-05
b [mmHg]	0,02494438	-0,1610917	-0,0040183	1,6147E-05
h _r [%]	0,03887301	-0,215019	-0,0083584	6,9863E-05
V ₅₀ [V]	0,53748385	0,79802697	0,42892661	0,18397803

Como el modelo de medición tiene variables que están relacionadas entre sí, se multiplican los coeficientes de sensibilidad por los coeficientes de correlación, de acuerdo al procedimiento detallado en el numeral 2.4.6.2:

$$2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)$$

La Tabla 28 muestra los valores obtenidos de la correlación entre los diferentes parámetros.

Tabla 28. Cálculos pertinentes a los coeficientes de correlación para la incertidumbre tipo A.

Coeficientes de correlación		$2 \cdot r(x_i, x_j) \cdot u_i(y) \cdot u_j(y)$
$r(t, b)$	0,21821789	1,0424E-05
$r(t, h_r)$	0,56011203	5,5656E-05
$r(t, V_{50})$	0,50636968	-0,0025821
$r(b, h_r)$	-0,1833397	-1,232E-05
$r(b, V_{50})$	0,33149677	-0,0011427
$r(h_r, V_{50})$	-0,4254356	0,00305051

El valor de la incertidumbre tipo A, de acuerdo a la ecuación (14) es:

$$u_{TA} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)} = 0,42834435 \text{ [kV]}$$

Cálculo de la incertidumbre tipo B

La incertidumbre tipo B está determinada por las características del equipo de medida FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II (cuya información se encuentra en la Tabla A1 del Anexo A). Además, de las características del dispositivo LUTRON PHB 318 (tres en uno) con el que se registran los datos de las condiciones atmosféricas (Tabla A6 del Anexo A).

Con estos datos se calcula la incertidumbre tipo B debida a la resolución y a la exactitud de los equipos y se multiplican por sus coeficientes de sensibilidad. El dispositivo de condiciones atmosféricas tiene exactitud directa, a diferencia de la del voltmetro, que fue definido en la práctica de la determinación de tensión de chispa.

$$u(\delta_i) = \frac{\delta_i}{\sqrt{3}}$$

$$u(r_i) = \frac{\text{Resolución}_i}{\sqrt{12}}$$

$$u_i \delta(y) = c_i u(\delta_i)$$

$$u_i r(y) = c_i u(r_i)$$

Las incertidumbres de resolución y exactitud para todas las variables se presentan en la Tabla 29:

Tabla 29. Cálculos pertinentes a la incertidumbre tipo B.

Incertidumbre Tipo B Exactitud				
Variable	δ	$u(\delta_i)$	$u_i \delta(y) = c_i \cdot u(\delta_i)$	$u_i^2 \delta(y)$
t [°C]	0,8	0,46188022	-0,1681239	0,02826564
b [mmHg]	1,2	0,69282032	-0,1116076	0,01245625
h _r [%]	3	1,73205081	-0,3724239	0,13869955
V ₅₀ [V]	2,37	1,36832014	1,09195637	1,19236871
Incertidumbre Tipo B Resolución				
Variable	r	$u(r_i)$	$u_i r(y) = c_i \cdot u(r_i)$	$u_i^2 r(y)$
t [°C]	0,1	0,02886751	-0,0105077	0,00011041
b [mmHg]	0,1	0,02886751	-0,0046503	2,1625E-05
h _r [%]	0,1	0,02886751	-0,0062071	3,8528E-05
V ₅₀ [V]	0,1	0,02886751	0,02303705	0,00053071

Se evalúa el valor de la incertidumbre tipo B como:

$$u_{TB} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i u(\delta_i)]^2 + [c_i u(r_i)]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2 \delta(y) + u_i^2 r(y)} = 1,17153379 \text{ [kV]}$$

El valor de la incertidumbre combinada es:

$$u_C = \sqrt{u_{TA}^2 + u_{TB}^2} = 1,24738539 \text{ [kV]}$$

Y la incertidumbre expandida es igual a:

$$v_{eff} = 102,1895$$

$$k = 1,9835$$

$$U = k \cdot u_C(y) = 1,9835 \cdot 1,24738539 = 2,47413 \text{ [kV]}$$

Expresión del mensurando

El resultado del mensurando para la tensión de chispa en el lado de alta tensión a las condiciones de referencia efectuado en la práctica de laboratorio, con su incertidumbre expandida se obtiene evaluando los valores promedio de las variables que inciden en el modelo físico, junto a su valor de incertidumbre:

$$(V_{H50})_0 = 0,7205 \cdot \frac{\overline{V_{L50}}}{\overline{K}} \pm U \text{ [kV]}$$

$$(V_{H_{50}})_0 = 0,7205 \cdot \frac{137}{0,9028517} \pm 2,47413 \text{ [kV]}$$

$$(V_{H_{50}})_0 = 109,3297 \pm 2,47413 \text{ [kV]}$$

Las muestras y resultados parciales de las demás pruebas, se encuentra en las Tablas B10 y B11 del Anexo B.

Finalmente se muestran los resultados para los diferentes experimentos realizados en la Tabla 30.

Tabla 30. Resultados finales para las pruebas de tensión de chispa $V_{50\%}$ con correcciones atmosféricas

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
$(V_{H_{50\%}})_0 \pm U \text{ [kV]}$	109,3 \pm 2,5	107,9 \pm 2,4	111,5 \pm 2,7	113,2 \pm 2,5

4.6 ENSAYOS SOBRE DISPOSITIVOS CONTRA SOBRETENSIONES (DPS) EN CORRIENTE ALTERNA

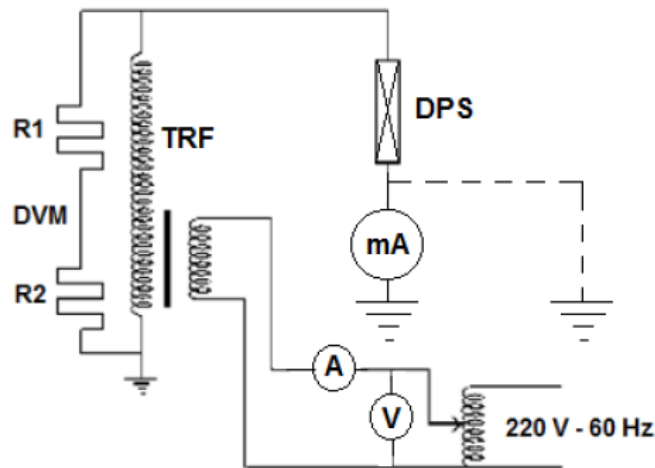
En este ensayo se tratarán dos tipos de DPS:

1. Los DPS de SiC (recortador), que utilizan válvulas de resistencias no lineales de carburo de silicio en serie con una estructura de explosores, a través de los cuales se descarga la sobretensión, además de disminuir la tensión aplicada a los bloques, impidiendo el paso de corrientes de fuga.
2. Los DPS ZnO (limitador), que contienen pastillas de óxido metálico que funcionan como varistores cuya impedancia se modifica de acuerdo al nivel de tensión al que se encuentra expuesto, produciéndose de esta manera una

circulación de corriente a través de ella, limitando de esta manera el nivel de tensión que llega al equipo que se desea proteger.

El montaje que se utiliza para llevar a cabo el ensayo de tensión es el mostrado en la Figura 15.

Figura 15. Esquema para montajes de DPS para ensayos de corriente alterna.



Fuente: RUGELES, J., & CHACÓN, J. C. (s.f.). *Laboratorio de Alta Tensión Manual de Prácticas*. UIS.

El proceso de medida para esta práctica es similar al que se describió en el ejemplo 4.1, con el mismo equipo de medida (FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II), pero incluye tratamiento estadístico.

Cálculo de la incertidumbre tipo A para la tensión de cebado:

La Tabla 31 muestra los valores de la tensión registrada en el lado de baja.

Tabla 31. Medidas para la tensión de cebado para todas las pruebas en el lado de baja tensión.

	Tensión de Cebado [V]			
Muestras	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
1	42,8	42	41	40,5
2	43,3	41,3	40,5	40,9
3	42,8	39,2	40,2	39,9
4	42,8	39,9	40,6	39,2
5	42,4	39,9	39,8	39,1

Los valores: promedio, desviación estándar e incertidumbre de la tensión obtenidas para la prueba 1 son:

$$\bar{V} = 42,82 [V]$$

$$s = 0,3194 [V]$$

$$u(x_1) = 0,1428 [V]$$

El valor de la incertidumbre tipo A.

$$u_{TA} = 0,1507 [kV]$$

Cálculo de la Incertidumbre tipo B

El procedimiento para hallar esta incertidumbre y las características del equipo de medida ya fueron descritos.

$$u_{TB} = 0,8705 [kV]$$

Incertidumbres combinada y expandida:

$$u_C = \sqrt{u_{TA}^2 + u_{TB}^2} = 0,8834 [kV]$$

$$U = 1,7518 [kV]$$

Incertidumbre para la tensión de reposición

Los lineamientos para calcular la incertidumbre de la tensión de reposición son los mismos que se describieron anteriormente para la tensión de cebado. En la Tabla 32 se muestran los datos obtenidos de las pruebas de tensión de cebado y reposición

Tabla 32. Resultados finales para las tensiones de cebado y reposición en DPS en el lado de alta tensión.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	$V_H \pm U [kV]$			
Tensión de cebado	45,2 ± 1,8	42,7 ± 2,1	42,6 ± 1,7	42,1 ± 1,9
Tensión de reposición	36,2 ± 1,7	33,7 ± 2,1	34,5 ± 1,6	34,5 ± 2,0

Los resultados parciales se encuentran en las tablas B12 y B13 del Anexo B.

Prueba de corriente de drenaje

Las corrientes de drenaje para ambos DPS fueron medidas de manera directa mediante el mismo amperímetro. Para el DPS de Carburo de Silicio (SiC) se

midieron corrientes en la escala de 200 [μA] del amperímetro y por el lado del DPS de Óxido de Zinc (ZnO) se midieron corrientes en la escala de 2 [mA].

El cálculo de la incertidumbre de las corrientes de drenaje contiene únicamente incertidumbre tipo B.

Las características del dispositivo con el cual se midieron las corrientes de drenaje se describen en la Tabla A7 del Anexo A. Las tablas 33 y 34 muestran los resultados de estas pruebas.

Tabla 33. Resultados de la prueba de corriente de drenaje en DPS SiC.

		Tensión aplicada en baja [V]				
Prueba		13,8	18,5	23,1	27,8	32,4
I ± U [μA]	1	8,2 ± 0,3	12,7 ± 0,3	24,2 ± 0,5	50,4 ± 0,7	98,6 ± 1,2
	2	9,4 ± 0,3	14,6 ± 0,4	25,0 ± 0,5	49,0 ± 0,7	101,4 ± 1,2
	3	8,4 ± 0,3	13,4 ± 0,3	23,5 ± 0,4	49,2 ± 0,7	100,7 ± 1,2
	4	8,8 ± 0,3	12,9 ± 0,3	24,7 ± 0,5	51,7 ± 0,7	100,6 ± 1,2

Tabla 34. Resultados de la prueba de corriente de drenaje en DPS ZnO.

		Tensión aplicada en baja [V]				
Prueba		13,8	18,5	23,1	27,8	32,4
I ± U [mA]	1	0,095 ± 0,003	0,126 ± 0,003	0,159 ± 0,004	0,209 ± 0,004	0,500 ± 0,007
	2	0,100 ± 0,003	0,131 ± 0,003	0,164 ± 0,004	0,208 ± 0,004	0,480 ± 0,007
	3	0,095 ± 0,003	0,125 ± 0,003	0,159 ± 0,004	0,212 ± 0,004	0,555 ± 0,008
	4	0,097 ± 0,003	0,126 ± 0,003	0,157 ± 0,004	0,207 ± 0,004	0,520 ± 0,007

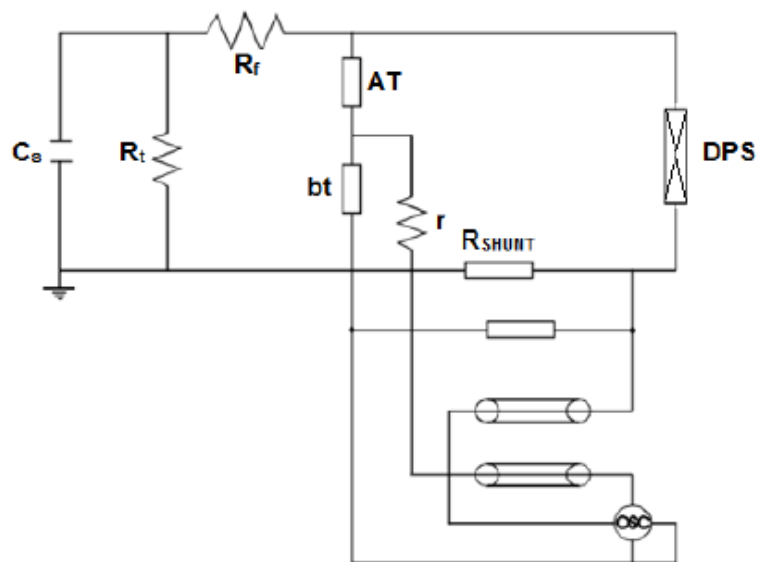
Los resultados de estos mensurandos se encuentran en las tablas B14 y B15 del Anexo B.

4.7 ENSAYOS SOBRE DISPOSITIVOS CONTRA SOBRETENSIONES (DPS) CON PRUEBAS DE IMPULSO

En el Laboratorio de Alta Tensión de la UIS se utilizan shunts tipo sleeve marca HAEFELY (especificaciones en que permiten estimar la corriente de un impulso que provoque una tensión de hasta 500 V. El valor resistivo del shunt puede ser reemplazado cambiando el elemento activo.

El montaje realizado para esta prueba se muestra en la Figura 16.

Figura 16. Esquema para montajes de DPS para ensayos de impulso atmosférico



Fuente: RUGELES, J., & CHACÓN, J. C. (s.f.). *Laboratorio de Alta Tensión Manual de Prácticas*. UIS.

Las variables que se miden (tensión y tiempo) en esta práctica son las mismas que se analizaron en la obtención de onda normalizada, el equipo utilizado para medir

dichas variables fue el FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II. Se deben tener en cuenta las mismas consideraciones descritas para el equipo de medida.

En el desarrollo de la práctica es necesario calcular valores de corriente de manera indirecta a través de un valor de tensión y la resistencia correspondientes. La Tabla 35 muestra los datos de escala y resolución del equipo mencionado.

Tabla 35. Escala y resolución del equipo de medida respecto a las variables de interés para los DPS de SiC y ZnO.

	DPS SiC		DPS ZnO	
	Escala	Resolución	Escala	Resolución
Tiempo [ns]	500	20		
Tiempo [μ s]	1	0,04	10	0,4
Tensión Pico [V]	20	0,8	20	0,8
Tensión (corriente) [V]	100	4	100	4

Cálculo de la incertidumbre de tensión y tiempo en general:

Se utilizan los mismos parámetros del ejemplo 4.3 y las especificaciones del dispositivo de medida FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II.

Las medidas en el tiempo se hallan de manera directa para todas las señales de tensión y corriente de ambos tipos de DPS, a excepción de la señal de tensión del DPS de SiC que necesita dos puntos en el eje de tiempo para hallar un valor de interés.

Se debe tener en cuenta que la medida del tiempo es al 50% del valor máximo en la cola para las señales de corriente.

Los modelos físicos de la tensión y de tiempo (para el DPS de SiC) de la señal de tensión son:

$$V_H = 0,7205V_L [kV] \quad (36)$$

$$T = t_1 - t_0 [\mu s] \text{ o } [ns] \quad (37)$$

Cálculo de la incertidumbre de corriente:

El proceso para calcular la incertidumbre de la corriente es el mismo independientemente del DPS, ya que el equipo de medida y las condiciones de implementación son mantienes.

A continuación, se describe el proceso para calcular la incertidumbre de la corriente pico para un DPS de SiC:

La resistencia Shunt tipo Sleeve implementada en el montaje fue la tipo SH H 2, cuyo valor fue medido por el FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II cuyas características son descritas en la Tabla A9 del Anexo A.

El osciloscopio registró un nivel de tensión máxima de 548 [V] y la medida de la resistencia registro un valor de 2,3 [Ω].

El modelo físico para medir el valor máximo de la corriente es:

$$I = \frac{V}{R} [A] \quad (38)$$

Donde

I : Es la corriente máxima calculada, en [A].

V : Es la tensión máxima medida en el osciloscopio, en [V].

R : Es el valor de la resistencia Shunt tipo Sleeve, en [Ω].

Los coeficientes de sensibilidad para este proceso de medición son:

$$c_1 = \left. \frac{\partial I}{\partial V} \right|_{V,R} = \left. \frac{1}{R} \right|_{V,R} = \frac{1}{2,3} = 0,4348 \left[\frac{1}{\Omega} \right]$$
$$c_2 = \left. \frac{\partial I}{\partial R} \right|_{V,R} = - \left. \frac{V}{R^2} \right|_{V,R} = - \frac{548}{2,3^2} = -103,59 \left[\frac{A}{\Omega} \right]$$

Calcular incertidumbre de la resolución y de la exactitud del equipo. Además, incluir la incertidumbre que representa la resistencia Shunt.

$$\text{Resolución}_V = 4 [V]$$

$$\text{Exactitud}_V = \pm(2\% + 1 \text{ pixel})$$

$$\delta_1 = \left(\frac{2V}{100} + 1 \cdot \text{Resolución} \right) = \left(\frac{2 \cdot 548}{100} + 4 \right) = 14,96 [V]$$

$$\text{Resolución}_R = 0,1 [\Omega]$$

$$\text{Exactitud}_R = \pm(0,5\% + 5 \text{ cuentas})$$

$$\delta_2 = \left(\frac{0,5R}{100} + 5 \cdot \text{Resolución} \right) = \left(\frac{2 \cdot 2,3}{100} + 0,5 \right) = 0,5115 [\Omega]$$

$$u(\delta_1) = \delta_1 = 14,96 [V]$$

$$u(\delta_2) = \delta_2 = 0,5115 [\Omega]$$

$$u(r_1) = \text{Resolución}_1 = 4 [V]$$

$$u(r_2) = \text{Resolución}_2 = 0,1 [\Omega]$$

Los valores del producto de los coeficientes de sensibilidad por la incertidumbre debida a resolución y exactitud del equipo de medición y de la resistencia utilizada son

$$u_1(y) = c_1(\delta_1) = 0,4348 \cdot 14,96 = 6,5046 [A]$$

$$u_2(y) = c_1(r_1) = 0,4348 \cdot 4 = 1,7392 [A]$$

$$u_3(y) = c_2(\delta_2) = -103,59 \cdot 0,5115 = -52,986 [A]$$

$$u_4(y) = c_2(r_2) = -103,59 \cdot 0,1 = -10,359 [A]$$

El valor de la incertidumbre tipo B es:

$$U = u_{TB} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i u(\delta_i)]^2 + [c_i u(r_i)]^2} = 54,407 [A]$$

Expresión del mensurando:

$$I = \frac{V}{R} \Big|_{\bar{V}, \bar{R}} \pm U [A]$$

$$I = \frac{548}{2,3} \pm 54,407 [A]$$

$$I = 238,26 \pm 54,407 [A]$$

Las tablas 36 a 39 presentan los resultados de los mensurandos para las pruebas realizadas.

Tabla 36. Resultado de los mensurandos de tensión y tiempo para la prueba de impulso en DPS de SiC.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Alta [kV]			
$V_H \pm U$ [kV]	$100 \pm 2,4$	$100,8 \pm 2,4$	$100 \pm 2,4$	$95,2 \pm 2,4$
	Tiempo [μ s]			
$T \pm U$ [μ s]	$2,52 \pm 0,08$	$2,76 \pm 0,04$	$1,96 \pm 0,04$	$1,76 \pm 0,04$

Tabla 37. Resultado de los mensurandos de corriente y tiempo para la prueba de impulso en DPS de SiC.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Alta [kV]			
$I \pm U$ [A]	240 ± 56	228 ± 52	216 ± 48	208 ± 48
	Tiempo [μ s]			
$T \pm U$ [μ s]	$1,80 \pm 0,04$	$1,92 \pm 0,02$	$2,92 \pm 0,04$	$2,00 \pm 0,02$

Tabla 38. Resultado de los mensurandos de tensión y tiempo para la prueba de impulso en DPS de ZnO.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Alta [kV]			
$V_H \pm U$ [kV]	73,6 ± 2,4	78,4 ± 2,4	71,2 ± 2,4	67,2 ± 2,4
	Tensión Alta [kV] (Tensión de sellado)			
$V_H \pm U$ [kV]	56,0 ± 1,6	63,2 ± 1,6	56,8 ± 1,6	56,8 ± 1,6
	Tiempo [μs]			
$T \pm U$ [μs]	36,0 ± 0,4	34,0 ± 0,4	34,0 ± 0,4	32,4 ± 0,4

Tabla 39. Resultado de los mensurandos de corriente y tiempo para la prueba de impulso en DPS de ZnO

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Alta [kV]			
$I \pm U$ [A]	48 ± 12	48 ± 12	56 ± 14	48 ± 12
	Tiempo [μs]			
$T \pm U$ [μs]	13,6 ± 0,4	14,0 ± 0,4	12,8 ± 0,4	13,6 ± 0,4

Los resultados completos de cada una de las pruebas anteriores se encuentran en las tablas B16 a B19 del Anexo B.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se realiza un análisis de los resultados obtenidos de cada una de las prácticas a las cuales se les efectuó la evaluación de incertidumbre, para lo cual se evalúa el cociente entre la incertidumbre expandida y el valor medio del mensurando en cada una de las pruebas, así se puede identificar las diferencias y analizar las razones de los patrones que se puedan presentar:

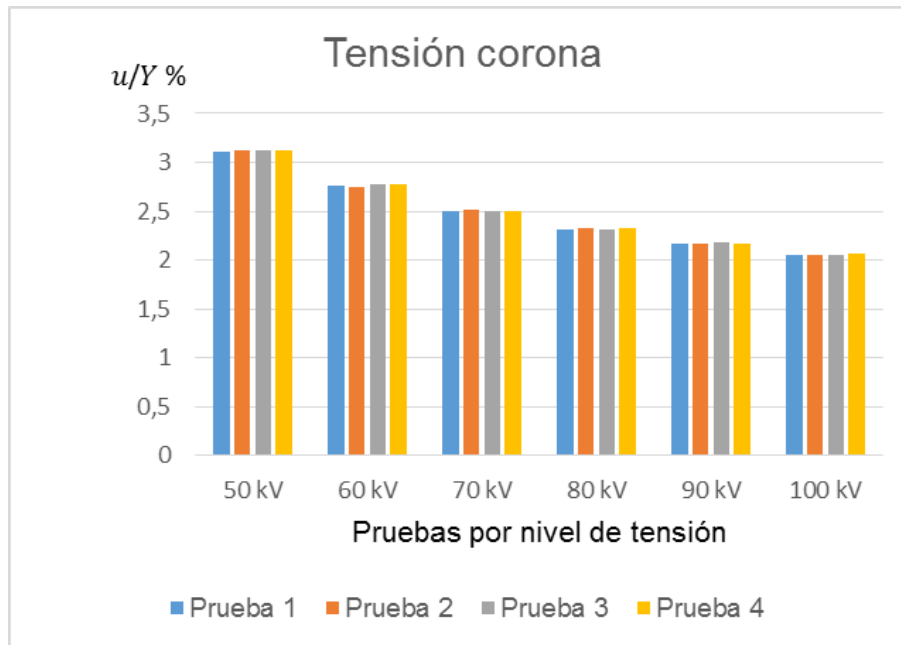
5.1 *TENSIÓN CORONA*

La práctica comprende la medición de diferentes niveles de tensión para experimentar los efectos esperados producto del efecto corona en el conductor energizado. La Figura 17 muestra la relación entre la incertidumbre y la tensión para diferentes niveles de tensión.

En la Figura 17 se observa que a medida que se aumenta el nivel de tensión en la prueba de corriente alterna, la proporción de la incertidumbre disminuye, la razón puede deberse a diversos factores.

Se debe aclarar que, en este caso, debido a las razones mencionadas en el numeral 0, para este mensurando únicamente se tuvo en cuenta la evaluación de la incertidumbre tipo B, debida a las características del equipo de medida utilizado (resolución y exactitud).

Figura 17. Incertidumbre relativa de la tensión corona.



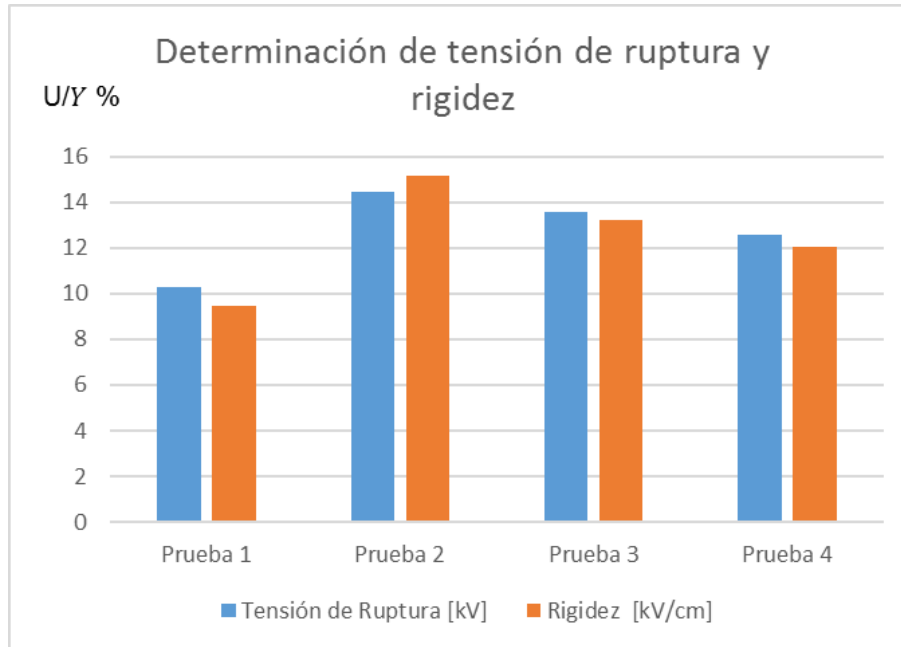
De esta manera, el valor de la incertidumbre en los niveles de tensión más bajos es comparativamente más grande con respecto al mensurando, debido a que la resolución es un factor más significativo que la exactitud (cuyo factor en los niveles más grandes se aproxima a una proporción de la medida).

Se debe tener en cuenta que para todos los niveles de esta prueba se usa la misma resolución.

5.2 TENSIÓN DE RUPTURA

La práctica de tensión de ruptura a aceites aislantes arrojó los resultados mostrados en la Figura 18.

Figura 18. Incertidumbre relativa de la tensión de ruptura y rigidez dieléctrica



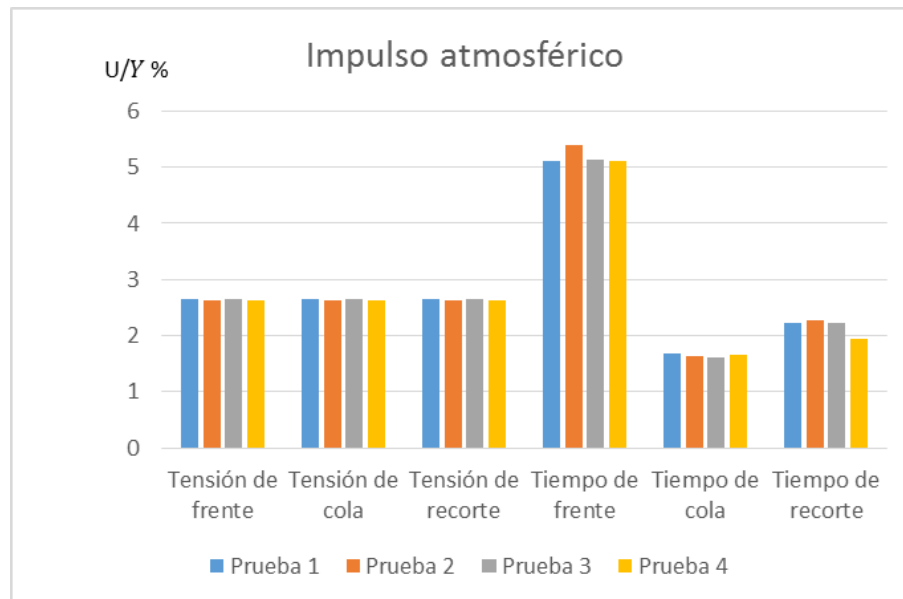
La prueba de ruptura de aceite dieléctrico y rigidez dieléctrica, presentan porcentajes de incertidumbre notoriamente más grandes, no solamente por el hecho de que se realiza un análisis más completo en comparación con la tensión corona, dado que en este caso es posible realizar más muestras, lo que hace posible incluir el aporte estadístico de la incertidumbre tipo A, además se incluyen fuentes de incertidumbre más notorias, como el instrumento analógico de medida, el criterio de lectura mencionado en el numeral 6.1.2, y la naturaleza de este tipo de prueba, en la que cualquier impureza en la muestra o electrodos, aunque imperceptible a simple vista puede generar fluctuaciones en las tensiones de ruptura. Este tipo de factores hacen que en ocasiones se generen diferencias entre pruebas, aun cuando se intenta garantizar que las condiciones sean las mismas.

5.3 PRUEBAS DE IMPULSO

En el caso de las pruebas de impulso, se evaluaron varios parámetros contemplados en la norma, y se obtuvieron sus respectivas incertidumbres como se

muestra en la Figura 19 para el impulso atmosférico y en la Figura 20 para el impulso de maniobra.

Figura 19. Incertidumbre relativa de los diferentes parámetros de impulso atmosférico



En esta práctica se involucran dos tipos de medida que requieren análisis diferentes en cuanto a los factores que intervienen y las fuentes de incertidumbre: medidas de tensión y de tiempo:

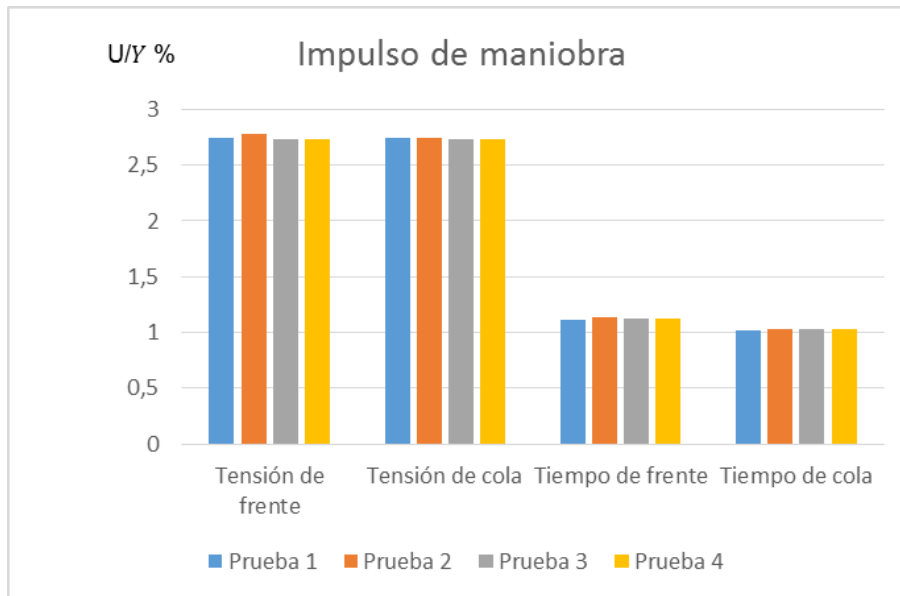
En cuanto a las medidas de tiempo, la escala constituye un factor muy importante como fuente de incertidumbre, así como el modelo de obtención, lo que podría explicar en principio la proporción más elevada que presenta el tiempo de frente para la prueba de impulso atmosférico, comparado con las demás medidas realizadas (ver Figura 19), pues este se evaluó de acuerdo a un procedimiento que involucra más pasos, y por tanto mayor incertidumbre.

Las medidas de tensión en este caso dan como resultado proporciones bastante uniformes, incluso en diferentes niveles de tensión y diferentes pruebas, esto posiblemente se deba a que se encuentran en la misma escala, fueron tomadas

con el mismo equipo (digital esta vez), bajo condiciones muy parecidas y además siguiendo un procedimiento estándar para su evaluación.

Con relación a las pruebas del impulso de maniobra, los tiempos fueron medidos directamente (sin modelo) y en la misma escala. Es notable la uniformidad de las medidas que se muestran en la Figura 20 y de forma análoga como ocurre con las medidas de tensión, resultados que concuerdan con algunas de las suposiciones mencionadas en impulso atmosférico, teniendo en cuenta que para impulso maniobra se utilizó un equipo diferente, aunque de la misma naturaleza, y en el mismo modo de operación.

Figura 20. Incertidumbre relativa de los diferentes parámetros de impulso maniobra



5.4 TENSIÓN DE CHISPA

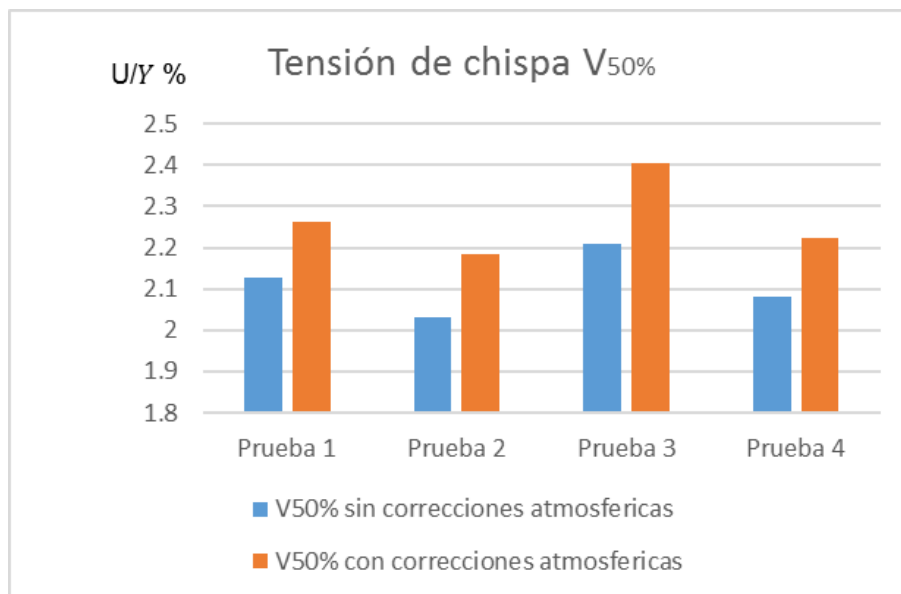
En el caso de las pruebas de la tensión de chispa, el mensurando es el que tiene mayor cantidad de fuentes de incertidumbre que se pudieron cuantificar, y esto se

ve reflejado de cierta manera en las diferentes proporciones obtenidas entre la relación de la incertidumbre y la medida estimada como se muestra en la Figura 21.

A pesar de que se involucran más factores relevantes en la evaluación, algunos de los cuales ya se han tratado en prácticas anteriores, el aspecto que más destaca en este caso, es el efecto de las correcciones a condiciones estándar de laboratorio, que aumentan notablemente la proporción de la incertidumbre de las pruebas.

La razón de estos resultados de incertidumbre dispares, tanto en la prueba corregida como en la original se atribuyen a la complejidad de ambos modelos, tanto el de obtención de la tensión de chispa (que además incluye las condiciones en las que se encuentra el objeto de prueba) como el modelo de correcciones, que involucra más variables y, por consiguiente, la cantidad de fuentes de incertidumbre (más instrumentos de medición entre otras).

Figura 21. Incertidumbre expandida relativa de la tensión de chispa con y sin correcciones atmosféricas



5.5 ENSAYOS DPS

En el laboratorio se realizan algunas de las pruebas mencionadas en las anteriores prácticas a dispositivos DPS bajo las mismas condiciones y con los mismos instrumentos de medida, por lo tanto, se cumplen aproximadamente los mismos principios que se han analizado hasta ahora, teniendo en cuenta que las condiciones del objeto de prueba pueden generar cambios en algunos de los parámetros medidos. Las figuras 22 a 26 presentan las relaciones obtenidas entre la incertidumbre y el valor estimado para los diferentes DSP analizados. El salto de Incertidumbre que se presenta en la prueba de corriente se debe principalmente a la exactitud en el equipo de medida de resistencia, pues ésta se encuentra alrededor de un valor considerablemente pequeño respecto a la escala del equipo utilizado para medirla.

Figura 22. Incertidumbre expandida relativa de la tensión de cebado y tensión de reposición de dos DPS.

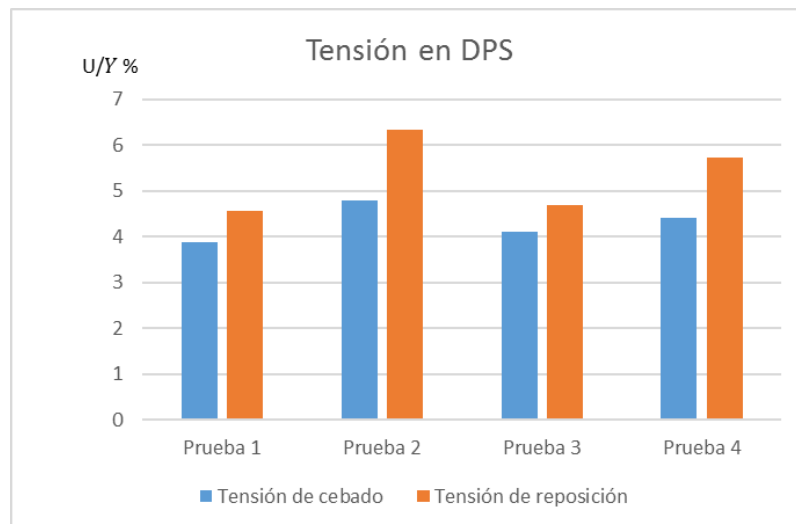


Figura 23..Incertidumbre expandida relativa de la corriente de drenaje de un DPS de SiC para diferentes niveles de tensión de corriente alterna.

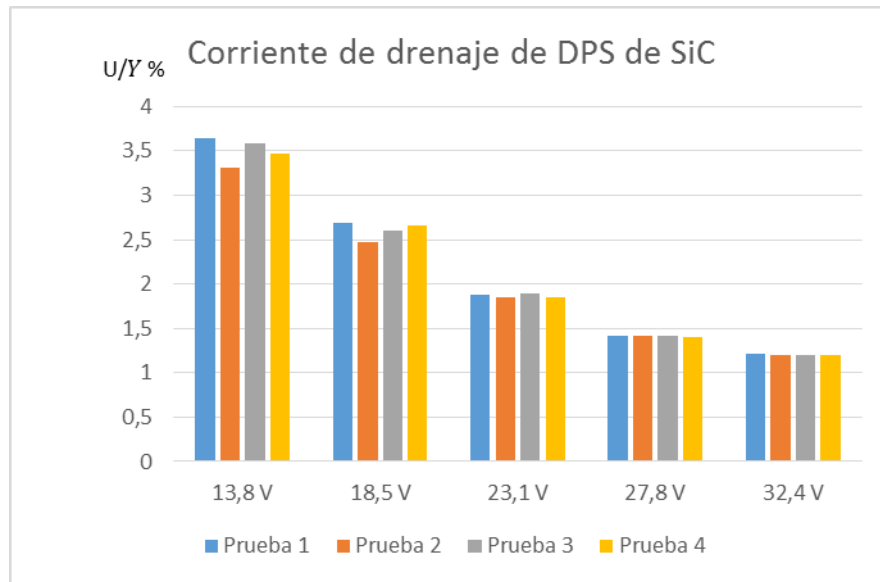


Figura 24.Incertidumbre expandida relativa de la corriente de drenaje de un DPS de ZnO para diferentes niveles de tensión de corriente alterna.

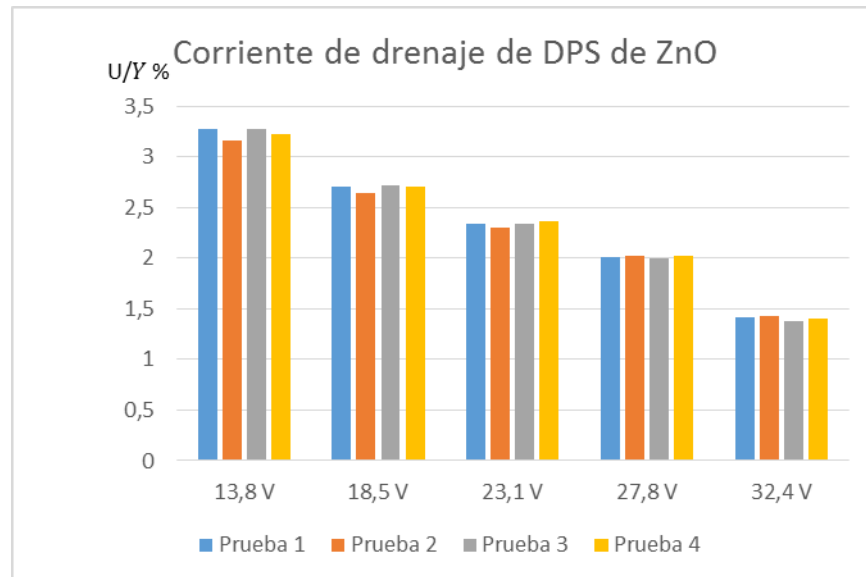


Figura 25. Incertidumbre expandida relativa de los parámetros de un DPS de SiC en prueba de impulso atmosférico.

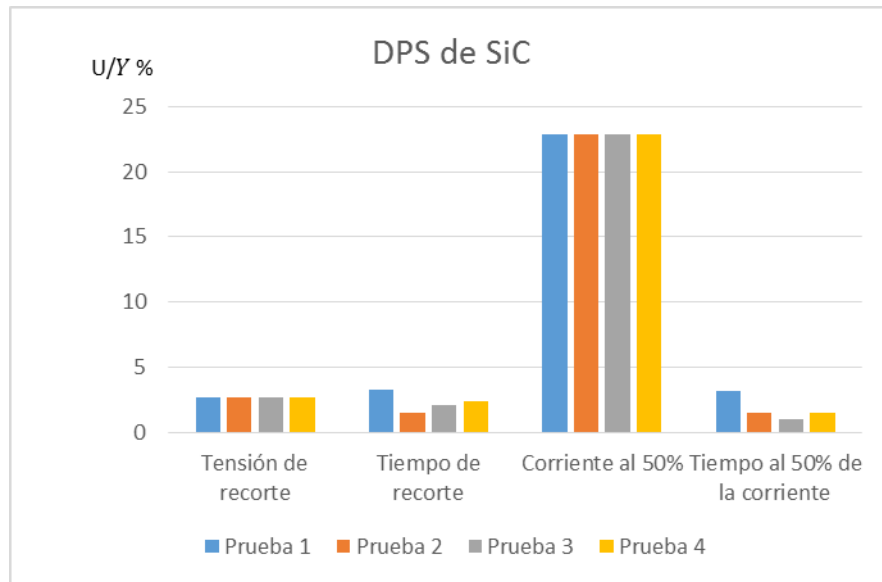
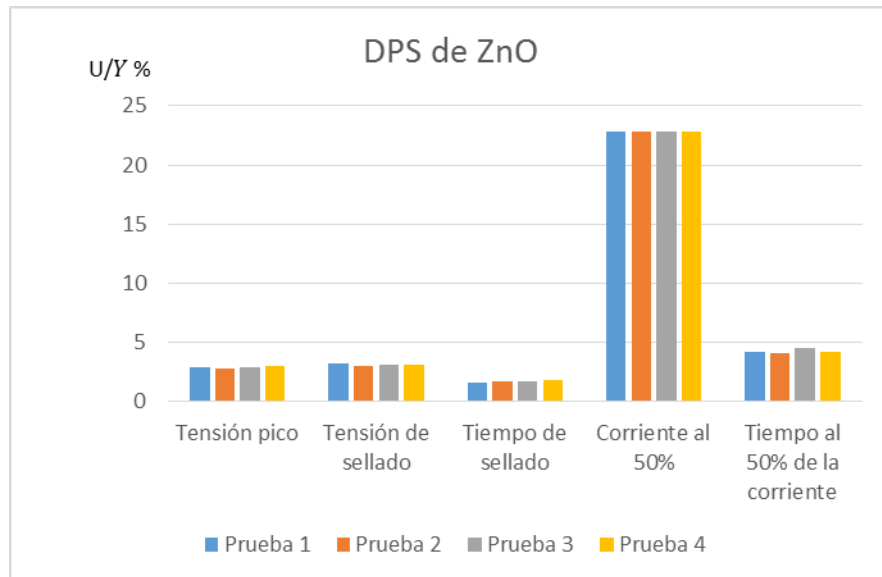


Figura 26. Incertidumbre expandida relativa de los parámetros de un DPS de ZnO en prueba de impulso atmosférico.



6. CONCLUSIONES

La evaluación de la incertidumbre en las medidas del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander, permite obtener un parámetro cuantitativo que proporciona mayor información acerca del mensurando requerido, además el proceso implícito para dicha evaluación contribuye a una mayor familiarización con el modelo físico representativo del fenómeno y las particularidades que lo componen, además de los factores externos que influyen en el proceso de medida, esto contribuye a que el ejecutor de las prácticas pueda establecer criterios más acertados acerca de la recolección y análisis de datos que le pueden permitir obtener mejores resultados de las mediciones.

Se seleccionó un modelo físico para cada una de las prácticas del laboratorio teniendo en cuenta, tanto el proceso de medición, como las aproximaciones necesarias para la estimación de la incertidumbre, de acuerdo a las necesidades del laboratorio y el criterio de las personas encargadas de efectuar dichas mediciones.

Este análisis presenta una estimación aproximada, utilizando los factores que se consideran más relevantes como fuentes de incertidumbre, y que a pesar de las diversas limitaciones que naturalmente se pueden encontrar en cualquier laboratorio de estas características (cantidad de datos , trazabilidad de los equipos, parámetros inexactos), los resultados obtenidos muestran lo que puede ser un patrón de repetibilidad de las mediciones que incentiva el implementar un análisis de incertidumbre, teniendo en cuenta que en este caso se trata de una primera aproximación a un procedimiento que puede ser tan exhaustivo como las condiciones de medición lo permitan.

La metodología elaborada se propone con motivo de orientar el proceso de estimación de la incertidumbre en las medidas que se establecen en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander, a través de una serie de pasos debidamente definidos, así como ejemplos de aplicación y un soporte computacional que simplifica el procesamiento matemático que un estudio de esta naturaleza requiere. Esta metodología sugerida está supeditada a los cambios que el ejecutor considere necesarios, de acuerdo a las consideraciones que se tengan en cuenta en el proceso, esto debido a que el método de evaluación de la incertidumbre no es simplemente un procedimiento mecánico, y por tanto, a pesar de que se siguen algunos lineamientos generales propuestos en la guía, ésta es flexible en cuanto a los modelos e instrumentos necesarios así como las fuentes de incertidumbre a tener en cuenta, aspectos que están bajo el criterio del evaluador.

La medición constituye una de las bases fundamentales de la ingeniería, y por esta razón no es posible concebir un proceso de formación integral que no aborde este tema. Es por ello que este trabajo de grado logra enriquecer a sus autores, no solamente en conocimientos técnicos en esta materia, también a través de la evaluación del criterio en el análisis de escenarios y en la toma de decisiones.

7. BIBLIOGRAFÍA

A. SCHMID, Wolfgang y LAZOS, Ruben J. Guía para estimar la incertidumbre de la medición. México, mayo de 2000.

LASTRE GOMEZ, Hedier Humberto. *Contrastación de las normas existentes en el cálculo de los factores de corrección por condiciones atmosféricas utilizando electrodos punta - placa*. Bucaramanga : UIS, 1996.

RUGELES, Julio y CHACÓN, Julio César. *Laboratorio de Alta Tensión Manual de Prácticas*. 3 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 2011.

The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Standard for High-Voltage Testing (Revision of IEEE Std 4-1995)). New York, 2013 . ISBN 1-55937-532-

Working Group on the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). *Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. Edición digital*. Centro Español de Metrología, 2008.

ANEXOS

Anexo A: Tablas de datos de equipos

En este anexo se presentan las tablas correspondientes a las especificaciones de los equipos utilizados en cada una de las prácticas del LAT-UIS.

Tabla A 1. Especificaciones del equipo de medida Fluke 105 en modo voltmetro.

FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II	
Tensión eficaz de corriente alterna (VCA) o de corriente alterna y continua (VCA+VCC)	
Rangos entrada directa	100 mV, 300 mV, 1 V, 3 V, 10 V, 30 V, 100 V, 250 V.
Rangos con sonda 10:1	1 V, 3 V, 10 V, 30 V, 100 V, 300 V, 1 kV, 2,5 kV.
Exactitud 50 Hz a 60 Hz	$\pm(1\% + 10 \text{ cuentas})$
Exactitud 1 Hz [20 Hz] a 20 kHz	$\pm(2\% + 15 \text{ cuentas})$
Exactitud 1 Hz [5 Hz] a 1 MHz	$\pm(3\% + 20 \text{ cuentas})$
Exactitud 1 Hz [CC] a 5 MHz	$\pm(10\% + 25 \text{ cuentas})$

Tabla A 2. Especificaciones del dispositivo chispometro.

CHISPOMETRO SIEMENS CON MEDIDOR ANALOGICO	
Tensión primario/secundario	60000/216 V
Resolución de tensión de ruptura	2 kV
Resolución de rigidez dieléctrica	5 kV/cm
Exactitud	$\pm 1,5\%$

Tabla A 3. Características técnicas del GI Haefely tipo S-serie SGS 800/20.

Máxima energía por etapa [kJ]	2,5	
Capacitancia por etapa, C_s [nF]	500 ± 5 %	
Rata máxima de repetición del impulso por minuto	2	
Inductancia por etapa [μ H]	≈ 2,5	
Tensión máxima por etapa [kV] ($0 \leq h \leq 1000$ m)	100	
Eficiencia para	IA	86 – 94 %
$C_s/C_b > 10$	IM	83 – 90 %
Resistencias R_p [Ω]	IA	138 (AZULES)
	IM	9,6 k Ω (AMARILLAS)
Resistencias R_s [Ω]	IA	20 (ROJAS)
	IM	20 (ROJAS)
Resistencias R_{se} [Ω]	IA	610
	IM	75 k Ω (60, 36)
Entrehierro [mm]	41	
Impulso del trigger para la unidad de carga [V]	+200	
Altura [m]	3,27	

Tabla A 4. Características técnicas del divisor capacitivo Haefely, tipo CS 1 000.

Tensión Máxima de medida, [kV]	IA (+)	1 000
	IM (+)	900
Relación	720,5 : 1	
Capacitancia unidad AT, [pF]	652,3	
Capacitancia unidad bT, [nF]	468,0	
Terminal de acople, [Ω]	75	
Resistencia de amortiguamiento, [Ω]	100 ± 10%	
Tiempo de respuesta, [ns]	< 100	
Altura, [m]	3,5	

Tabla A 5. Especificaciones de los equipos de medida en modo osciloscopio.

	FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II	FLUKE 190 - 102 SCOPEMETER
Exactitud vertical (tensión)	$\pm(2\% + 1 \text{ pixel})$	$\pm(2,1\% + 0,04 \text{ rango/div})$
Exactitud horizontal (tiempo)	$\pm(0,1\% + 1 \text{ pixel})$	$\pm(100 \text{ ppm} + 0,04 \text{ div})$
Pixeles	25 pixeles/div	

Tabla A 6. Especificaciones del equipo 3 en 1 para medir condiciones atmosféricas.

LUTRON PHB 318	
Humedad	
Rango	10 a 95 %RH
Resolución	0,1 %RH
Exactitud: Lectura ≥ 70 %RH	$\pm(3\% \text{ reading} + 1 \text{ %RH})$
Exactitud: Lectura < 70 %RH	$\pm 3 \text{ %RH}$
Presión barométrica	
Rango	7,5 a 825,0 mmHg
Resolución	0,1 mmHg
Exactitud	$\pm 1,2 \text{ mmHg}$
Temperatura	
Rango	0 a 50 °C
Resolución	0,1 °C
Exactitud	$\pm 0,8 \text{ °C}$

Tabla A 7. Especificaciones del equipo de medida de corriente

UNIVOLT DT-830	
Rangos corriente alterna	200 μ A, 2 mA, 20 mA, 200 Ma, 10 A.
Exactitud rango 200 μ A	$\pm(1\% + 2$ cuentas)
Exactitud rango 2 mA	
Resolución rango 200 μ A	0,1 μ A
Resolución rango 2 mA	1 μ A

Tabla A 8. Especificaciones del Shunt tipo sleeve SH H.

Sleeve Shunts SH H			
Tipo	SH H 2	SH H 5	SH H 10
Caída de tensión nominal U_n	500 V	500 V	500 V
Caída de tensión Máx. U_{max}	1000 V	1000 V	1000 V
Corriente pico nominal I_n	250 A	100 A	50 A
Corriente pico Máx. I_{max}	500 A	200 A	100A
Resistencia R	2 Ω	5 Ω	10 Ω
Precisión de la Resistencia	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
Tiempo de respuesta parcial T_g	10 ns	10 ns	10 ns
Frecuencia de repetición a U_n / I_n	1 s	1 s	1 s
Frecuencia de repetición a U_{max} / I_{max}	4 s	4 s	4 s
Peso	1,5 kg		
Dimensiones	H 115 mm, A 70 mm, L255 mm		
Precisión en la medición de la resistencia $< \pm 1\%$			

Tabla A 9. Especificaciones FLUKE 105 en modo óhmetro.

FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II	
Modo óhmetro (Ω)	
Rangos entrada directa	300 Ω , 3 k Ω , 30 k Ω , 300 k Ω , 3 M Ω , 30M Ω
Exactitud	$\pm(0,5\% + 5$ cuentas)
Escala completa de lectura	3000 cuentas

Anexo B: Tablas de resultados parciales

En este anexo se presentan los resultados parciales necesarios para la evaluación de la incertidumbre en cada una de las prácticas del LAT-UIS.

Tabla B 1. Resultados del mensurando para todos los niveles de tensión corona

		Niveles de tensión de la prueba [kV]					
Prueba		50	60	70	80	90	100
V _H [kV]	1	50,218	60,0295	70,263	80,2855	90,097	100,3305
	2	49,9015	60,346	69,7355	80,0745	90,2025	99,803
	3	50,007	59,6075	70,3685	80,18	89,7805	100,1195
	4	49,796	59,502	70,1575	79,969	90,6245	99,4865
U [kV]	1	1,5607497	1,6586536	1,7607934	1,8608480	1,9588131	2,0610069
	2	1,5575920	1,6618122	1,7555279	1,8587414	1,9598666	2,0557389
	3	1,5586445	1,6544421	1,7618465	1,8597947	1,9556527	2,0588997
	4	1,5565394	1,6533893	1,7597403	1,8576881	1,9640804	2,0525780

Tabla B 2. Resultados del mensurando para las pruebas de tensión de ruptura.

Muestra	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
1	22	22	17	19
2	22	22	19	18
3	20	28	19	24
4	18	24	22	22
5	21	21	27	26
6			16	16
7			15	20
8			19	17
9			22	23
10			20	18
U _{TA}	0,748331477	1,2489996	1,097471842	1,044030651
U _{TB}	0,604284977	0,611882614	0,601785122	0,603523059
U _C	0,961852553	1,390827212	1,251634842	1,205918771
\bar{V}	20,6	23,4	19,6	20,3
U	2,119382998	3,383327209	2,664524261	2,556364252

Tabla B 3. Resultados del mensurando para las pruebas de rigidez dieléctrica.

Muestra	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
1	90	90	70	77
2	90	90	77	75
3	80	115	77	99
4	75	100	90	90
5	85	85	110	107
6			65	65
7			60	83
8			77	70
9			90	95
10			83	75
U _{TA}	2,91547594	5,33853912	4,54716028	4,31843593
U _{TB}	1,61633329	1,66569304	1,60066676	1,61477717
U _C	3,33354666	5,59236384	4,82066393	4,61046572
\bar{V}	84	96	79,9	83,6
U	7,92156007	14,5419233	10,5685570	10,0749090

Tabla B 4. Tiempo de frente y tensión pico con sus respectivas incertidumbres expandidas para impulso atmosférico.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Baja [V]			
Valor pico	138,4	140,8	138,4	140
0,9Vp	124,8	126,4	124,8	126,4
0,3Vp	41,6	42,4	41,6	42,4
	Tiempo desde origen [ns]			
$t_A(0,3Vp)$	420	540	680	520
$t_B(0,9Vp)$	1220	1300	1480	1320
Origen virtual	20	160	280	120
	Tensión Alta [kV]			
V_H	99,7172	101,4464	99,7172	100,87
U	2,63457049	2,66832736	2,63457049	2,65707271
	Tiempo de Frente [ns]			
T_1	1333,33333	1266,66667	1333,33333	1333,33333
U	68,05359	68,223114	68,496813	68,22375

Tabla B 5. Tiempo de cola y tensión pico con sus respectivas incertidumbres expandidas para impulso atmosférico.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Baja [V]			
Valor pico	136,8	139,2	135,2	140
0,5Vp	68,8	69,6	67,2	70,4
	Tiempo desde origen [μ s]			
Origen virtual	0,4	0,4	0,4	0,4
$t_c(0,5V_p)$	49,6	51,2	51,6	50,4
	Tensión Alta [kV]			
V_H	98,5644	100,2936	97,4116	100,87
U	2,61207792	2,64582041	2,58959527	2,65707271
	Tiempo de Frente [μ s]			
T_2	49,2	50,8	51,2	50
U	0,82611156	0,82698343	0,82720174	0,82654722

Tabla B 6. Tiempo de recorte y tensión pico con sus respectivas incertidumbres expandidas para impulso atmosférico.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Baja [V]			
Valor pico	138,4	140	136,8	139,2
0,9Vp	124,8	126,4	123,2	125,6
0,3Vp	41,6	42,4	40,8	41,6
	Tiempo desde origen [μ s]			
Origen virtual	0,16	0,04	0,24	0,16
Tiempo recorte	3,84	3,64	3,92	4,4
$t_A(0,3Vp)$	0,56	0,4	0,64	0,56
$t_B(0,9Vp)$	1,36	1,12	1,44	1,36
	Tensión Alta [kV]			
V_H	99,7172	100,87	98,5644	100,2936
U	2,63457049	2,65707271	2,61207792	2,64582041
	Tiempo de Frente [μ s]			
T_3	3,68	3,6	3,68	4,24
U	0,08206565	0,08190025	0,08214757	0,08236616

Tabla B 7. Tiempo de frente y tensión pico con sus respectivas incertidumbres expandidas para impulso de maniobra.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Baja [V]			
Valor pico	136,8	130,4	140	139,2
	Tiempo desde origen [μ s]			
T ₁	204,8	200	201,6	203,2
	Tensión Alta [kV]			
V _H	98,5644	93,9532	100,87	100,2936
U	2,7082999	2,6137645	2,7556275	2,7437921
	Tiempo de Frente [μ s]			
T ₁	204,8	200	201,6	203,2
U	2,2772692	2,2769277	2,2770415	2,2771554

Tabla B 8. Tiempo de cola y tensión pico con sus respectivas incertidumbres expandidas para impulso maniobra.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Baja [V]			
Valor pico	136,8	136,8	140,8	139,2
	Tiempo desde origen [μ s]			
T ₂	2224	2208	2208	2208
	Tensión Alta [kV]			
V _H	98,5644	98,5644	101,4464	100,2936
U	2,7082999	2,7082999	2,7674653	2,7437921
	Tiempo de Frente [μ s]			
T ₂	2224	2208	2208	2208
U	22,785220	22,784081	22,784081	22,784081

Tabla B 9. Resultados del mensurando para todas las pruebas de tensión de chispa V50%.

Muestras	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
1	134	134	136	137
2	136	136	138	140
3	136	136	138	140
4	136	136	138	140
5	136	136	140	140
6	138	136	140	140
7	138	137	140	142
8	138	137	140	142
9	138	137	143	142
10	140	137	143	142
\bar{V}_L	137	136,2	139,6	140,5
s	1,69967317	0,91893658	2,22111083	1,58113883
u(x ₁)	0,53748385	0,29059326	0,70237692	0,5
u _{TA}	0,38725711	0,20937245	0,50606257	0,36025
u _{TB}	0,98609403	0,98276693	0,99690716	1,00065017
u _C	1,05940999	1,0048222	1,11799964	1,06352284
V _H	98,7085	98,1321	100,5818	101,23025
U	2,10051009	1,99195737	2,22074712	2,10817352

Tabla B 10. Muestras correspondientes a las pruebas 2, 3 y 4 de todas las variables medibles de tensión de chispa V50% con correcciones atmosféricas.

Prueba 2				
Muestras	t [°C]	b [mmHg]	hr [%]	V50 [V]
1	27,5	676,8	63,4	134
2	27,5	676,9	63,5	136
3	27,5	676,9	63,5	136
4	27,5	676,9	63,5	136
5	27,5	676,9	63,5	136
6	27,5	676,9	63,5	136
7	27,6	677,2	63,1	137
8	27,6	677,2	63,1	137
9	27,6	677,2	63,1	137
10	27,6	677,2	63,1	137
Prueba 3				
Muestras	t [°C]	b [mmHg]	hr [%]	V50 [V]
1	27,2	676,7	61,6	136
2	27,2	676,8	61,2	138
3	27,2	676,8	61,2	138
4	27,2	676,8	61,2	138
5	27,2	676,6	59,3	140
6	27,2	676,6	59,3	140
7	27,2	676,6	59,3	140
8	27,2	676,6	59,3	140
9	27	676,6	59,9	143
10	27	676,6	59,9	143

Prueba 4				
Muestras	t [°C]	b [mmHg]	hr [%]	V50 [V]
1	26,2	678,5	56,4	137
2	26,2	678,6	56,5	140
3	26,2	678,6	56,5	140
4	26,2	678,6	56,5	140
5	26,2	678,6	56,5	140
6	26,2	678,6	56,5	140
7	26,3	678,6	55,7	142
8	26,3	678,6	55,7	142
9	26,3	678,6	55,7	142
10	26,3	678,6	55,7	142

Tabla B 11. Comparación de los resultados obtenidos para todas las pruebas de tensión de chispa V50% con correcciones atmosféricas

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
k_d	0,87430225	0,868668553	0,869331475	0,87447844
k_h	0,96837859	0,95529091	0,963998178	0,97773567
K	0,9028517	0,909323583	0,90179784	0,89439147
u_{TA}	0,42834435	0,226954962	0,622984333	0,41960783
u_{TB}	1,17153379	1,169533256	1,193455932	1,1991186
u_c	1,24738539	1,191350743	1,346271348	1,27041574
\overline{V}_{L0}	137	136,2	139,6	140,5
V_{H0}	109,329695	107,9176895	111,5347538	113,18338
U	2,47412909	2,355759033	2,681291304	2,51669799

Tabla B 12. Resultados para la tensión de cebado para todas las pruebas en alterna.

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
\bar{V}_L	42,82	40,46	40,42	39,92
u _{TA}	0,15068414	0,54268445	0,21205238	0,37210255
u _{TB}	0,87045604	0,85609012	0,85584663	0,85280304
u _C	0,88340219	1,01360579	0,88172539	0,93044793
V _H	45,1751	42,6853	42,6431	42,1156
U	1,75181914	2,05015305	1,74865541	1,85377638

Tabla B 13. Medidas para la tensión de reposición para todas las pruebas en alterna.

	Tensión de Reposición [V]			
Muestras	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
1	34,7	29,8	32,3	32,4
2	34,2	32,4	32,8	33,7
3	34,4	32	32,8	33,6
4	34,5	33,6	32,9	30,9
5	33,8	32,1	32,7	33
\bar{V}_L	34,32	31,98	32,7	32,72
u_{TA}	0,16138397	0,64897508	0,11064933	0,53939293
u_{TB}	0,81871585	0,80447285	0,80885527	0,80897701
u_C	0,83447015	1,03360787	0,81638847	0,97231093
V_H	36,2076	33,7389	34,4985	34,5196
U	1,65473432	2,13555581	1,61908286	1,97361172

Tabla B 14. Datos y resultados de incertidumbre expandida de todas las pruebas en alterna para la corriente de drenaje del DPS de SiC.

		Tensión aplicada en baja [V]				
		13,8	18,5	23,1	27,8	32,4
Prueba	Corriente de drenaje DPS SiC [μ A]					
1	8,2	12,7	24,2	50,4	98,6	
2	9,4	14,6	25	49	101,4	
3	8,4	13,4	23,5	49,2	100,7	
4	8,8	12,9	24,7	51,7	100,6	
U [μ A]	1	0,29920561	0,34194882	0,45317104	0,711106680	1,19020838
	2	0,31054146	0,36016107	0,46097722	0,69720872	1,21811165
	3	0,30109134	0,34864882	0,44634627	0,69918810	1,21113541
	4	0,30486718	0,34386189	0,45804912	0,72393991	1,21013883

Tabla B 15. Datos y resultados de incertidumbre expandida de todas las pruebas en alterna para la corriente de drenaje del DPS de ZnO.

		Tensión aplicada en baja [V]				
		13,8	18,5	23,1	27,8	32,4
Prueba	Corriente de drenaje DPS ZnO [mA]					
1	0,095	0,126	0,159	0,209	0,5	
2	0,1	0,131	0,164	0,208	0,48	
3	0,095	0,125	0,159	0,212	0,555	
4	0,097	0,126	0,157	0,207	0,52	
U [mA]	1	0,00311488	0,00340992	0,00372667	0,00421047	0,00707106
	2	0,00316227	0,00345775	0,00377486	0,00420076	0,00687313
	3	0,00311488	0,00340036	0,00372667	0,00423962	0,00761593
	4	0,00313383	0,00340992	0,00370741	0,00419105	0,00726911

Tabla B 16. Tensión pico y tiempo de recorte con sus respectivas incertidumbres expandidas para todas las pruebas de impulso del DPS de SiC.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Baja [V]			
Valor pico	139,2	140	139,2	132
0,9Vp	125,6	126,4	125,6	119,2
0,3Vp	41,6	42,4	41,6	40
	Tiempo desde origen [ns] (para la prueba 1 en [μs])			
Origen virtual	0,08	0	0	80
Tiempo recorte	2,6	2760	1960	1820
t _A (0,3Vp)	0,48	400	380	440
t _B (0,9Vp)	1,28	1200	1140	1160
	Tensión Alta [kV]			
V _H	100,2936	100,87	100,2936	95,106
U	2,64582041	2,6570727	2,6458204	2,5446607
	Tiempo [ns] (para la prueba 1 en [μs])			
T	2,52	2760	1960	1740
U	0,08137055	41,448976	41,015139	40,979492

Tabla B 17. Corriente y tiempo al 50% con sus respectivas incertidumbres expandidas para todas las pruebas de impulso del DPS de SiC.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Baja [V]			
Valor pico	548	520	500	480
0,5Vp	276	260	252	240
	Tiempo desde origen [ns] (para la prueba 1 en [μs])			
t(0,5Vp)	1,8	1920	2920	2000
	Corriente [A]			
I	238,2608696	226,0869565	217,3913043	208,6956522
U	54,40846512	51,64208506	49,66630206	47,69071182
	Tiempo [ns] (para la prueba 1 en [μs])			
T	1,8	1920	2920	2000
U	0,057855337	29,672991	30,419178	29,732137

Tabla B 18. Tensión pico, tensión de sellado y tiempo de sellado con sus respectivas incertidumbres expandidas para todas las pruebas de impulso del DPS de ZnO.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Baja [V]			
Valor pico	102,4	109,6	99,2	92,8
Tensión sellado	77,6	88,8	79,2	79,2
	Tiempo desde origen [μ s]			
Tiempo sellado	36	34	34	32,4
	Tensión Alta [kV]			
V _H	73,7792	78,9668	71,4736	66,8624
U	2,13140219	2,23146469	2,08704562	1,99857089
	Tensión Alta [kV] (Tensión de sellado)			
V _H	55,9108	63,9804	57,0636	57,0636
U	1,78996099	1,94345122	1,81180409	1,81180409
	Tiempo [μ s]			
T	36	34	34	32,4
U	0,59168910	0,59021690	0,59021690	0,58904139

Tabla B 19. Corriente y tiempo al 50% con sus respectivas incertidumbres expandidas para todas las pruebas de impulso del DPS de ZnO.

	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Tensión Baja [V]			
Valor pico	107,2	108,8	124,8	112,8
0,5Vp	53,6	54,4	62,4	56,8
	Tiempo desde origen [μ s]			
t(0,5Vp)	13,6	14	12,8	13,6
	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
	Corriente [A]			
I	46,60869565	47,30434783	54,26086957	49,04347826
U	10,64456716	10,80264986	12,38371	11,19787712
	Tiempo [μ s]			
T	13,6	14	12,8	13,6
U	0,575382447	0,575670044	0,574807655	0,575382447

Anexo C: Tabla T-Student de dos colas

Este anexo muestra la tabla t Student de dos colas utilizada en los cálculos relacionados a grados de libertad en las prácticas del LAT-UIS que lo requieran.



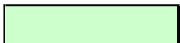
Tabla C 1. Tabla t Student de dos colas.

gl	ÁREA DE DOS COLAS						
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001	0,0001
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619	6366,198
2	1,886	2,920	4,303	6,695	9,925	31,598	99,992
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924	28,000
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610	15,544
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869	11,178
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959	9,082
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408	7,885
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041	7,120
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781	6,594
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587	6,211
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437	5,921
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318	5,694
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221	5,513
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140	5,363
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073	5,239
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015	5,134
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965	5,044
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922	4,966
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883	4,897
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850	4,837
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819	4,784
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792	4,736
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767	4,693
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745	4,654
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725	4,619
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707	4,587
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690	4,558
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674	4,530
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659	4,506
30	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646	4,482
40	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551	4,321
60	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460	4,169
100	1,290	1,660	1,984	2,364	2,626	3,390	4,053
140	1,288	1,656	1,977	2,353	2,611	3,361	4,006
∞	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291	3,891

Anexo D: Tutorial

Como complemento se añade un tutorial para utilizar^{10 11} el archivo anexo de Excel *Plantilla_U_LAT.xlsx* que sirve como herramienta de ayuda para la estimación de la incertidumbre de las mediciones efectuadas en el LAT. Dicho archivo contiene dos hojas de cálculo, la primera hoja (General) se utiliza para estimar la incertidumbre de cualquier práctica de laboratorio en general y la segunda hoja (FCA) está diseñada para el cálculo de la incertidumbre de una medida de alta tensión a condiciones de referencia (con correcciones atmosféricas).

Como criterio general en el archivo se encuentran tres tipos de celdas que se distinguen por su color, en la siguiente tabla se describe cada celda:

Tipo de celda	Descripción
	Lista desplegable de selección. Se utiliza para seleccionar tipo de medición y consecuentemente tipo de prueba. También en el caso de que no se trabaje con un equipo predeterminado.
	Celda NO modificable. Cualquier alteración de este tipo de celda puede afectar la programación de plantilla.
	Celda modificable por el usuario. Este tipo de celda está diseñada para agregar valores a las muestras de medida y datos particulares del equipo de medida.

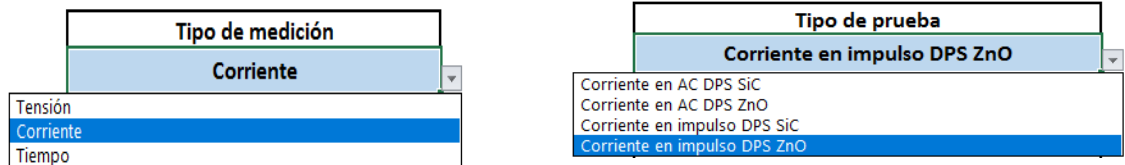
Estimación de la incertidumbre para mediciones en general.

¹⁰ Se recomienda trabajar en el sistema internacional de medida, con separador decimal coma (,).

¹¹ En la hoja de cálculo se encuentra oculta la base de datos, por lo que se sugiere NO cambiar ningún valor asociado.

Se explicará el funcionamiento de la plantilla con un ejemplo.

1. Seleccionar tipo de medición y tipo de prueba.



La selección del tipo de medida va ajustada por la siguiente tabla:

Tensión	Corriente	Tiempo
Tensión AC con tanque	Corriente en AC DPS SiC	Tiempo de frente IA
Tensión de ruptura	Corriente en AC DPS ZnO	Tiempo de cola IA
Rigidez dieléctrica	Corriente en impulso DPS SiC	Tiempo de recorte IA
Impulso atmosférico	Corriente en impulso DPS ZnO	Tiempo de frente IM
Impulso de maniobra		Tiempo de cola IM
Tensión de chispa V50		

2. El modelo físico y el coeficiente de sensibilidad se ajustan por defecto. Algunos coeficientes de sensibilidad, como las corrientes de impulso en DPS, se ajustan dependiendo de las muestras.

Modelo Físico
$I = V/R$ [A]

Coeficiente de sensibilidad	
c1	0,434782609
c2	-21,32325142

3. El operador no está sujeto a un equipo de medida en particular, por lo que existe la opción de seleccionar si se mide o no, con un equipo predeterminado.

Si se selecciona un equipo predeterminado hay que tener en cuenta que el equipo de medida y sus características vienen relacionados con las prácticas de laboratorio en que fueron empleados a lo largo de este proyecto.

Equipo predeterminado
SI

Si el equipo NO es predeterminado, llenar la tabla de la derecha.

DATOS DEL EQUIPO DE MEDIDA NUEVO			
	Nombre/Referencia	Exactitud	Resolución
Variable 1			
Variable 2			

DATOS DEL EQUIPO DE MEDIDA			
	Equipo de medida	Exactitud	Resolución
Variable 1	FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II - SCOPE MODE	$\pm(2\% + 1 \text{ pixel})$	0,8
Variable 2	FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II - Ω MODE	$\pm(0,5\% + 5 \text{ cuentas})$	0,1

En caso de que el equipo utilizado no corresponda a los datos mostrados en la tabla color crema, se debe cambiar la celda azul a NO y llenar la tabla verde.

Equipo predeterminado
NO

Si el equipo NO es predeterminado, llenar la tabla de la derecha.

DATOS DEL EQUIPO DE MEDIDA NUEVO			
	Nombre/Referencia	Exactitud	Resolución
Variable 1	ABC	$\pm(1,5\% + 10 \text{ cuentas})$	0,1
Variable 2	XYZ	$\pm(2,2\% + 7 \text{ cuentas})$	0,2

DATOS DEL EQUIPO DE MEDIDA			
	Equipo de medida	Exactitud	Resolución
Variable 1	ABC	$\pm(1,5\% + 10 \text{ cuentas})$	0,1
Variable 2	XYZ	$\pm(2,2\% + 7 \text{ cuentas})$	0,2

Se puede notar que los datos de la tabla verde se copian en la tabla color crema, lo significa que los datos han sido cargados.

En el caso de este ejemplo, una medida es tomada en modo osciloscopio, por lo cual se activa la celda de escala para poder cambiar dicho valor. Aparece un valor por defecto, el cual fue utilizado para el ejemplo 4.7. Para mediciones que no contemplen equipos en modo osciloscopio, el cuadro cambia su color completamente a crema.

DATOS PARA EL EQUIPO DE MEDIDA EN MODO OSCILOSCOPIO

Corriente impulso DPS		
	Escala [V/div]	Resolución
DPS SiC	100	4
DPS ZnO	20	0,8

4. Registrar las muestras obtenidas en las columnas verdes, para mediciones que tengan solo una variable medible, la segunda columna cambia a color crema.

REGISTRO DE DATOS

Muestras	Variables	
	Tensión [V]	Resistencia [Ω]
1	112,8	2,3
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
Promedio	112,8	2,3

A pesar de que hubo pruebas en los ejemplos que solo tenían una sola muestra, la plantilla ofrece la posibilidad de ingresar hasta diez muestras para todos los tipos de mediciones.

Los grados de libertad se cargan a partir de la tabla anterior.

GRADOS DE LIBERTAD

Descripción		Variable 1	Variable 2
Datos estadísticos	v1	0	0
Exactitud del equipo	v2	100	100
Resolución del equipo	v3	1000	1000

5. Los resultados de la incertidumbre se muestran automáticamente y se disponen para el análisis del usuario.

RESULTADOS DE LA INCERTIDUMBRE

INCERTIDUMBRE TIPO A				
Variable	s	u(xi)	ui(y)=ci*u(xi)	ui^2(y)
Tensión [V]	0	0	0	0
Resistencia [Ω]	0	0	0	0
INCERTIDUMBRE TIPO B Exactitud				
Variable	δ	u(δi)	uiδ(y)=ci*u(δi)	ui^2δ(y)
Tensión [V]	3.056	3.056	1.328695652	1.765432136
Resistencia [Ω]	0.5115	0.5115	-10.9068431	118.9592264
INCERTIDUMBRE TIPO B Resolución				
Variable	r	u(ri)	uir(y)=ci*u(ri)	ui^2r(y)
Tensión [V]	0.8	0.8	0.347826087	0.120982987
Resistencia [Ω]	0.1	0.1	-2.132325142	4.54681051

Incertidumbres		Factor de cobertura		Expresión del mensurando	
uTA [A]	0	veff	NO	I [A]	49.04347826
uTB [A]	11.19787712	k		1 U [A]	11.19787712
uC [A]	11.19787712			U/I [%]	22.83255087
				I ± U [A]	48.8 ± 11.2

Estimación de la incertidumbre con correcciones atmosféricas.

Las características de la plantilla se conservan, a diferencia, que para este caso se trabaja en simultáneo con Matlab, debido a la complejidad del modelo físico que representa la corrección a condiciones de referencia. En esta plantilla hay que tener en cuenta:

1. Equipo de medida

Para el cálculo de la tensión a condiciones de referencia, se miden cuatro variables, de las cuales solo el equipo de medida para la tensión se puede cambiar. Si el equipo mide en modo osciloscopio se activa la celda de escala.

DATOS DEL EQUIPO DE MEDIDA			
	Equipo de medida	Exactitud	Resolución
Temperatura [°C]	PHB - 318 - TEMPERATURE MODE	±(0,8)	0,1
Presión [mmHg]	PHB - 318 - BAROMETER MODE	±(1,2)	0,1
Humedad relativa [%]	PHB - 318 - HUMIDITY MODE	±(3)	0,1
Tensión [V]	FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II - AC MODE	±(1% + 10 cuentas)	0,1

Tensión en modo osciloscopio
Escala [V/div]

DATOS DEL EQUIPO DE MEDIDA			
	Equipo de medida	Exactitud	Resolución
Temperatura [°C]	PHB - 318 - TEMPERATURE MODE	±(0,8)	0,1
Presión [mmHg]	PHB - 318 - BAROMETER MODE	±(1,2)	0,1
Humedad relativa [%]	PHB - 318 - HUMIDITY MODE	±(3)	0,1
Tensión [V]	FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II - SCOPE MODE	±(2% + 1 pixel)	0,8

Tensión en modo osciloscopio
Escala [V/div]
20

2. El registro de datos.

Los datos se deben escribir únicamente en el orden que se muestra a continuación, de modo que se mantenga el orden de las variables.

REGISTRO DE DATOS

Muestras	Variables			
	Temperatura [°C]	Presión [mmHg]	Humedad relativa [%]	Tensión [V]
1	26,3	678,8	60,8	134
2	26,3	678,6	60,7	136
3	26,3	678,6	60,7	136
4	26,3	678,6	60,7	136
5	26,3	678,6	60,7	136
6	26,4	678,7	60,8	138
7	26,4	678,7	60,8	138
8	26,4	678,7	60,8	138
9	26,4	678,7	60,8	138
10	26,3	678,8	60,4	140
Promedio	26,34	678,68	60,72	137

3. Cambios en el modelo físico.

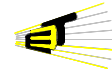
Debido a variaciones en las pruebas, como la relación del divisor, el tipo de electrodos, tipo de prueba de tensión, el modelo físico se debe modificar y esto se hace directamente en las líneas de código del archivo de Matlab, *Plantilla_U_LAT.m*, mostrado en la Tabla D1.

Tabla D 1. Algoritmo usado para el procesamiento matemático

<pre>clear all hoja=2; % Valores promedio de todas las variables %</pre>	<pre>% EVALUACION DEL MODELO % t=tp; b=bp; hr=hp; V50=V50p;</pre>
--	---

<pre> prom=xlsread('Plantilla_U_LAT.xlsx', hoja,'F40:I40'); tp=prom(1); bp=prom(2); hp=prom(3); V50p=prom(4); % Condiciones atmosféricas de referencia % t0=20; b0=101.3; h0=11; % Exponentes de correcciones de densidad de aire y humedad % m=1; n=1; w=1; % MODELO FISICO % syms t b hr V50 kd=(0.1333224*b/b0)^m*((273+t0)/(2 73+t))^n; CV=3.0814e-4*t.^3+7.4063e- 3*t.^2+0.3289*t+4.9237; h=CV*hr/100; k=6.801942e-5*h^2-9.831233e- 3*h+1.098898; kh=k^w; K=kd/kh; </pre>	<pre> % Factores de corrección % kdm=eval(kd); khm=eval(kh); Km=eval(K); KK=[kdm khm Km]'; xlswrite('Plantilla_U_LAT.xlsx',KK,hoj a,'J63') % Tensión a condiciones de referencia % V0m=eval(V0); xlswrite('Plantilla_U_LAT.xlsx',V0m,h oja,'J72') % Coeficientes de sensibilidad % ct=eval(dt); cb=eval(db); ch=eval(dh); cV50=eval(dV50); cs=[ct cb ch cV50]'; xlswrite('Plantilla_U_LAT.xlsx',cs,hoja ,'I13') </pre>
--	--

$V0=0.7205 \cdot V50/K;$ $dt=diff(V0,t);$ $db=diff(V0,b);$ $dh=diff(V0,hr);$ $dV50=diff(V0,V50);$	
---	--



ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Tipo de medición
Corriente

Tipo de prueba
Corriente en impulso DPS ZnO

Modelo Físico
$I = V/R$ [A]

Coeficiente de sensibilidad	
c1	0.434782609
c2	-21.32325142

Equipo predeterminado
SI

Si el equipo NO es predeterminado,
llenar la tabla de la derecha.

DATOS DEL EQUIPO DE MEDIDA NUEVO			
Variable 1	Nombre/Referencia	Exactitud	Resolución
Variable 2			

DATOS DEL EQUIPO DE MEDIDA			
Variable	Equipo de medida	Exactitud	Resolución
Variable 1	FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II - SCOPE MODE	$\pm(2\% + 1 \text{ pixel})$	0.8
Variable 2	FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II - Ω MODE	$\pm(0,5\% + 5 \text{ cuentas})$	0.1

REGISTRO DE DATOS		
Muestras	Variables	
	Tensión [V]	Resistencia [Ω]
1	112.8	2.3
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
Promedio	112.8	2.3

DATOS PARA EL EQUIPO DE MEDIDA EN MODO OSCILOSCOPIO		
Corriente impulso DPS		
	Escala [V/div]	Resolución
DPS SiC	100	4
DPS ZnO	20	0.8

GRADOS DE LIBERTAD			
	Descripción	Variable 1	Variable 2
Datos estadísticos	v1	0	0
Exactitud del equipo	v2	100	100
Resolución del equipo	v3	1000	1000

RESULTADOS DE LA INCERTIDUMBRE				
INCERTIDUMBRE TIPO A				
Variable	s	u(xi)	ui(y)=ci*u(xi)	ui^2(y)
Tensión [V]		0	0	0
Resistencia [Ω]		0	0	0
INCERTIDUMBRE TIPO B Exactitud				
Variable	δ	u(δ)	ui(δ)=ci*u(δ)	ui^2(δ)
Tensión [V]	3.056	3.056	1.328695652	1.765432136
Resistencia [Ω]	0.5115	0.5115	-10.9068431	118.9592264
INCERTIDUMBRE TIPO B Resolución				
Variable	r	u(ri)	uir(y)=ci*u(ri)	ui^2r(y)
Tensión [V]	0.8	0.8	0.347826087	0.120982987
Resistencia [Ω]	0.1	0.1	-2.132325142	4.54681051

Incertidumbres		Factor de cobertura		Expresión del mensurando	
uTA [A]	0	veff	NO	I [A]	49.04347826
uTB [A]	11.19787712	k		U [A]	11.19787712
uC [A]	11.19787712			U/I [%]	22.83255087
				I \pm U [A]	48.8 \pm 11.2



ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Modelo Físico
$(V_H)_0 = a \cdot \frac{V_H}{K} [kV]$

Coeficiente de sensibilidad	
c1	-0.363998881
c2	-0.16109167
c3	-0.215019027
c4	0.798026967

DATOS DEL EQUIPO DE MEDIDA			
	Equipo de medida	Exactitud	Resolución
Temperatura [°C]	PHB - 318 - TEMPERATURE MODE	±(0,8)	0.1
Presión [mmHg]	PHB - 318 - BAROMETER MODE	±(1,2)	0.1
Humedad relativa [%]	PHB - 318 - HUMIDITY MODE	±(3)	0.1
Tensión [V]	FLUKE 105 SCOPEMETER SERIES II - AC MODE	±(1% + 10 cuentas)	0.1

Tensión en modo osciloscopio
Escala [V/div]

REGISTRO DE DATOS

Muestras	Variables			
	Temperatura [°C]	Presión [mmHg]	Humedad relativa [%]	Tensión [V]
1	26.3	678.8	60.8	134
2	26.3	678.6	60.7	136
3	26.3	678.6	60.7	136
4	26.3	678.6	60.7	136
5	26.3	678.6	60.7	136
6	26.4	678.7	60.8	138
7	26.4	678.7	60.8	138
8	26.4	678.7	60.8	138
9	26.4	678.7	60.8	138
10	26.3	678.8	60.4	140
Promedio	26.34	678.68	60.72	137

GRADOS DE LIBERTAD

Descripción	Temperatura [°C]	Presión [mmHg]	Humedad relativa [%]	Tensión [V]
Datos estadísticos v1	9	9	9	9
Exactitud del equipo v2	100	100	100	100
Resolución del equipo v3	1000	1000	1000	1000

RESULTADOS DE LA INCERTIDUMBRE

INCERTIDUMBRE TIPO A				
Variable	s	u(x)	u(y)=ci*u(x)	ui*2(y)
Temperatura [°C]	0.051639778	0.016329932	-0.005944077	3.5332E-05
Presión [mmHg]	0.078881064	0.024944383	-0.004018332	1.6147E-05
Humedad relativa [%]	0.122927259	0.038873013	-0.008358437	6.98635E-05
Tensión [V]	1.699673171	0.53748385	0.428926607	0.183978034

INCERTIDUMBRE TIPO B Exactitud				
Variable	δ	u(δ)	u(δ)(y)=ci*u(δ)	ui*2δ(y)
Temperatura [°C]	0.8	0.461880215	-0.168123881	0.02826564
Presión [mmHg]	1.2	0.692820323	-0.111607583	0.012456253
Humedad relativa [%]	3	1.732050808	-0.37242388	0.138699546
Tensión [V]	2.37	1.368320138	1.09195637	1.192368714

INCERTIDUMBRE TIPO B Resolución				
Variable	r	u(r)	u(r)(y)=ci*u(r)	ui*2r(y)
Temperatura [°C]	0.1	0.028867513	-0.010507743	0.000110413
Presión [mmHg]	0.1	0.028867513	-0.004650316	2.16254E-05
Humedad relativa [%]	0.1	0.028867513	-0.006207065	3.85277E-05
Tensión [V]	0.1	0.028867513	0.023037054	0.000530706

Coeficientes de correlación		
r(x,y)	2*r(xi,xj)*ui(y)*uj(y)	
r(t,b)	0.21821789	1.04244E-05
r(t,hr)	0.560112034	5.56563E-05
r(t,V)	0.506369684	-0.002582053
r(b,hr)	-0.183339699	-1.23157E-05
r(b,V)	0.331496772	-0.001142716
r(hr,V)	-0.42543563	0.003050506

Factores de correcciones por densidad de aire y humedad	
kd	0.874302248
kh	0.968378586
K	0.902851695

Incertidumbres	Factor de cobertura	Expresión del mensurando
uTA [kV]	0.428344347	veff 133.1690379 V0 [kV] 109.3296945
uTB [kV]	1.171533791	k 1.977961264 U [kV] 2.467279976
uC [kV]	1.247385387	U/V0 [%] 2.256733624
		V0 ± U [kV] 109,3 ± 2,5