

# Metrology and Quality in the Laboratory of Physics for Engineering Students

Luis Enrique Llamosa Rincón, M.Sc<sup>1</sup>, Beatriz Cruz Muñoz, Ph.D<sup>1</sup>, and Carlos Arturo Holguín Tabares, M.Sc<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, lellamo@utp.edu.co, bcruz@utp.edu.co, holguin@utp.edu.co

*Abstract— The authors experience is presented in this work, in which we have implemented a methodology that aims to ensure the quality of the measurements taken in experimental practices of physics laboratory courses targeted at the basic training of engineering students from the Technological University of Pereira (UTP). To meet this goal, students are located from the course of Physics Laboratory 1, within the context of national and international standards that exist around the metrological themes and vocabulary, and are introduced to the application of a generic methodology for estimation of measurement uncertainty of the experimental results. This methodology has been designed and implemented with the aim of creating a culture around this issue. The methodology is based on the GUM "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" published by the ISO, which is used for scientific, industrial and legal level, where the proper handling of the measuring equipment and proper expression of their measurements is of utmost importance in the context of quality and competitiveness.*

*Keywords— quality, education, measurement uncertainty, physics laboratory, metrology.*

**Digital Object Identifier (DOI):** <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.025>

**ISBN:** 13 978-0-9822896-8-6

**ISSN:** 2414-6668

**13<sup>th</sup> LACCEI Annual International Conference:** “Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?”

July 29-31, 2015, Santo Domingo, Dominican Republic

**ISBN:** 13 978-0-9822896-8-6

**ISSN:** 2414-6668

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.025>

# Metrología y Calidad en el Laboratorio de Física para Estudiantes de Ingeniería

Luis Enrique Llamosa Rincón, M.Sc<sup>1</sup>, Beatriz Cruz Muñoz, Ph.D<sup>2</sup> and Carlos Arturo Holguín Tabares, M.Sc<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Risaralda, Colombia.

lellamo@utp.edu.co, bcruz@utp.edu.co, holguin@utp.edu.co

*Resumen– Se presenta en este trabajo la experiencia de los autores, mediante la cual se ha implementado una metodología que tiene como objetivo asegurar la calidad de las mediciones que se realizan en las prácticas experimentales de los cursos de laboratorio de física dirigidos a la formación básica de los estudiantes de ingeniería de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). Para cumplir con este objetivo se ubica a los estudiantes desde el curso de laboratorio de física I, dentro del contexto de las normas nacionales e internacionales que existen alrededor de los temas y vocabulario metrológicos y se les introduce en la aplicación de una metodología genérica para la estimación de la incertidumbre de medición de sus resultados experimentales; esta metodología ha sido diseñada e implementada con el objetivo de crear una cultura alrededor de este tema. La metodología se basa en la GUM “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” publicada por la ISO, la cual es utilizada a nivel científico, industrial y legal, en donde el manejo adecuado de los equipos de medida y la expresión adecuada de sus mediciones es de primordial importancia dentro del contexto de la calidad y la competitividad.*

*Palabras clave– Calidad, enseñanza, incertidumbre de medición, laboratorio de física, , metrología.*

## I. INTRODUCCIÓN

Se entiende que en la educación en ciencias básicas, ingeniería, tecnología y técnica existen entre otras, dos áreas del conocimiento que las atraviesan horizontalmente y que, actualmente, no se encuentran debidamente desarrolladas dentro de la formación del estudiante de ingeniería, ellas son:

- La Metrología, como ciencia de la medición.
- Las Normas de la Calidad, como conjunto de premisas que ordenan los procesos de investigación, desarrollo y producción.

Unido a lo anterior, en los cursos de laboratorio de física tanto de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) como de muchas universidades del país, se ha podido observar que no se realiza el debido aseguramiento metrológico, no se realiza la estimación de la incertidumbre de medición de los resultados experimentales y si se realiza no se utiliza la metodología adecuada; por lo tanto se hace necesario formar e introducir al estudiante en esta cultura metrológica, de tal forma que tanto estudiantes y profesores reporten de manera adecuada la incertidumbre de medición en sus mediciones y resultados experimentales en general, para lo cual se requiere de un manejo adecuado de los instrumentos de medición y de los datos experimentales que son medidos.

Con base en lo anterior se ha diseñado e implementado una metodología, para que los estudiantes de la UTP, puedan

realizar el cálculo de la incertidumbre de medición con base en la norma colombiana GTC 51 “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones” [1], la cual es equivalente a la GUM “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements, publicada por la ISO [2], adoptada por la industria y los experimentalistas en general, para los cuales el manejo adecuado de los equipos de medida y la expresión adecuada de sus mediciones es de primordial importancia.

Con base en la implementación de esta metodología se crea una cultura metrológica, basada en normas internacionales, que actualmente son utilizadas a nivel científico, industrial y legal; con la finalidad de crearle a la comunidad educativa una cultura metrológica consciente, acerca de la expresión correcta de los resultados de las mediciones realizadas en los laboratorios de física, puesto que el resultado de cualquier medición NO está completo, si no está acompañado por una declaración cuantitativa de su incertidumbre, lo cual permite valorar la confiabilidad de dichos resultados y realizar un aseguramiento metrológico de los mismos.

Dicho de la manera más simple, la metrología es la ciencia de las mediciones; la metrología es la encargada de estudiar, diseñar y establecer las técnicas de medición requeridas para alcanzar la incertidumbre necesaria, conforme a la aplicación particular, en los resultados de las mediciones. También es la encargada de investigar, experimentar y establecer los patrones de referencia primarios en el ámbito internacional; de mantener los patrones nacionales de los diferentes países o de mantener los instrumentos de referencia utilizados en el ámbito de la industria (cuando éstas poseen su propio laboratorio de metrología). De manera que, mediante un proceso denominado trazabilidad, el último instrumento utilizado en el ámbito industrial está referido al patrón internacional. Con el fin de mantener esa igualdad aproximada, los distintos organismos y laboratorios mantienen relación y ponen en práctica la intercomparación de patrones. Por otro lado, a nivel de los gobiernos se establecen instituciones que vigilan y regulan las actividades metrológicas en el país y supervisan su cumplimiento por parte de los diferentes sectores, entidades o personas responsables. De lo anterior, nace la clasificación de la metrología en legal, científica e industrial. El papel de la metrología se hace realmente relevante cuando el proceso de medición es vital en algún tipo de transacción comercial, en aplicaciones militares, en aplicaciones en el campo de la salud, en la producción de medicinas o de alimentos, en la realización de pruebas para

construcciones de ingeniería civil, en la realización de diagnósticos para descubrir la causa de algún problema eléctrico, en la realización de trabajos destinados al alcance del uso racional de la energía, en el monitoreo rutinario de los sistemas electromecánicos, mecánicos y electrónicos, en la verificación de límites de contaminantes del ambiente o valores de niveles de radiación, en el monitoreo permanente de las diversas magnitudes físicas que intervienen en los procesos de producción, y muy especialmente, en la realización de pruebas de calidad. Sin la metrología, sería imposible verificar la calidad de los productos o de los procesos, definida en la normativa internacional. Dicho de otra manera, la metrología y la normalización son vitales para el aseguramiento de la calidad; por todos los aspectos anteriores se hace necesario introducir a los estudiantes de los programas de ingeniería en esta cultura, donde el manejo de los instrumentos de medición y la estimación de la incertidumbre de medición son de primordial importancia; esto se puede lograr introduciéndolos a estos aspectos desde los cursos básicos de laboratorio en las diferentes áreas.

## II. ANTECEDENTES

En nuestro país la mayoría de los desarrollos e investigaciones que se realizan no cuentan con un aseguramiento de la calidad de las mediciones, el cual implica como mínimo la utilización de instrumentos calibrados que aseguren su trazabilidad. Unido a todo esto, la infraestructura de laboratorios de metrología en nuestro país es mínima. Todo lo anterior hizo que los miembros del grupo de electrofisiología del departamento de física de la Universidad Tecnológica de Pereira, desde el año 2000 iniciaran todo un proceso de capacitación en temas metrológicos y normativos que condujo a la presentación de proyectos de investigación a COLCIENCIAS (entidad rectora del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación en Colombia) que tenían entre sus objetivos principales disponer de laboratorios de metrología en las áreas de calibración de equipos de medidas eléctricas y equipo electro-médico, este objetivo se ha logrado; en la actualidad se dispone de laboratorios de metrología acreditados bajo la norma NTC-ISO/IEC – 17025 [3], en las áreas mencionadas, los cuales prestan servicios a la región y al país. Con base en todo el trabajo anterior y en la infraestructura montada, el grupo de electrofisiología en su área de metrología, observando las falencias que existen en cuanto a formación en metrología en nuestra región y en el país, decidió implementar todo un proceso que ha pretendido educar en metrología partiendo de las necesidades que existen internamente dentro de la Universidad y el medio externo.

## III. MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales utilizados corresponden al equipo de laboratorio con que cuenta en la actualidad el departamento de física para la realización de las prácticas de los laboratorio de física I, II, y III, que imparte dentro de su formación básica a los estudiantes de ingeniería de la Universidad. En los

laboratorios respectivos se ubica un computador personal para cada uno de los grupos de trabajo, con el fin de realizar el tratamiento estadístico de los datos experimentales, el análisis gráfico y la estimación de la incertidumbre de medición utilizando para ello como herramienta el Excel. La metodología implementada en las guías del laboratorio de física diseñadas, consiste en familiarizar al estudiante del laboratorio de física I, con los conceptos introductorios de la medida tales como: sistema internacional de unidades, medida directa, medida indirecta, exactitud, tolerancia, error, incertidumbre, importancia de la medida dentro del contexto de la calidad, etc.; para continuar, con las reglas de expresión de resultados experimentales, es decir, cifras significativas y redondeo de medidas experimentales, y finalmente introducir al estudiante en el tratamiento estadístico de datos experimentales y aplicación del método general para el cálculo de la incertidumbre de medición, en el cual se plantea un esquema paso a paso para facilitar su cálculo y su aprendizaje. Posteriormente se aplican los fundamentos adquiridos en la realización de los experimentos de física respectivos, reforzándose los mismos con su aplicación en los diferentes experimentos propuestos para los tres cursos de laboratorio que tienen que ver los estudiantes de ingeniería de la UTP en su formación básica. A continuación se presentan algunos de los objetivos que se pretenden cumplir en el programa de laboratorio de física I, que para los autores de este trabajo son fundamentales:

- Ilustrar y manejar los procesos de la investigación Científica.
- Analizar fenómenos, haciendo descripciones e interpretaciones.
- Identificar y aplicar de manera correcta el sistema internacional de unidades (SI).
- Adquirir habilidad en el manejo de los instrumentos de medición identificando sus características metrológicas.
- Estar en capacidad de realizar el cálculo de la incertidumbre de mediciones directas e indirectas en procesos experimentales.
- Adquirir habilidad en la toma, presentación e interpretación de datos mediante el análisis gráfico.
- Asegurar la calidad de las mediciones que se realizan en los experimentos planteados y relacionar las mismas dentro del contexto de la calidad y la competitividad y dentro de los procesos de investigación, desarrollo y producción.
- Despertar interés y deseo de aprender Física.

Los experimentos que se plantean en este curso son los siguientes:

EXPERIMENTO # 0: Guía de introducción - Introducción a la medida - La metrología como ciencia de la medición. Esta experiencia de introducción tiene como objetivos:

- Estudiar y analizar los aspectos fundamentales de la metrología (ciencia de la medición) y su importancia dentro del contexto de la calidad.
- Identificar y diferenciar los términos más utilizados dentro del lenguaje metrológico.
- Utilizar adecuadamente las reglas internacionales que hablan del manejo gramatical del Sistema Internacional de unidades.
- Diferenciar entre medición directa e indirecta.

EXPERIMENTO # 1: Cifras significativas. Esta experiencia fundamental tiene como objetivos:

- Establecer y aplicar las reglas para determinar el número de cifras significativas en una medida experimental.
- Aprender e implementar las reglas básicas para el redondeo de mediciones.
- Expresar de manera adecuada los resultados de mediciones obtenidos experimentalmente.
- Efectuar cálculos teniendo en cuenta el número correcto de cifras significativas.
- Calcular valores medios, desviación estándar ( $\sigma$ ) y tolerancia de la medida e interpretar desde la ciencia física estos resultados.

EXPERIMENTO # 2 (DOS SESIONES): Tratamiento estadístico de datos experimentales y aplicación del método general para el cálculo de incertidumbre de medición (medidas directas). Esta experiencia que se considera fundamental tiene como objetivos:

- Realizar de manera adecuada la medición del tiempo que tarda un balón en descender por un plano inclinado.
- Adquirir habilidad en el uso y aplicación de las herramientas estadísticas en el análisis de medidas de naturaleza aleatoria.
- Construir e interpretar un histograma de densidad de probabilidad.
- Calcular el valor medio, la varianza, la desviación estándar y el error estadístico de una muestra de datos experimentales.
- Determinar cualitativamente si un conjunto de datos experimentales se distribuye normalmente.
- Calcular la incertidumbre tipo A para los datos experimentales obtenidos.
- Calcular las incertidumbres tipo B para los datos experimentales obtenidos.
- Calcular la incertidumbre combinada y expandida de una medición directa.
- Expresar el resultado de la medición con su respectiva incertidumbre.

EXPERIMENTO # 3: Medidas de pequeñas longitudes. Dentro de los objetivos más importantes de esta práctica se encuentran:

- Realizar medidas directas e indirectas, expresando los resultados de las mediciones con el número correcto de cifras significativas.

- Calcular el área de una moneda con los diámetros medidos con un calibrador, un tornillo micrométrico y una regla graduada en mm y expresar el resultado con el número correcto de cifras significativas.
- Calcular la incertidumbre de medición para algunas de las medidas directas realizadas.

EXPERIMENTO # 4: Tratamiento gráfico de datos experimentales – funciones lineales- ley de Hooke.

EXPERIMENTO # 5 (DOS SESIONES): Tratamiento gráfico de datos experimentales – funciones no lineales – dependencia del período de un péndulo con su longitud.

EXPERIMENTO # 6 (DOS SESIONES): Movimiento uniformemente acelerado – caída libre – Estimación de la incertidumbre en medidas indirectas. Esta práctica es de fundamental importancia pues se introduce a los estudiantes al cálculo de incertidumbre de medidas indirectas.

En los siguientes experimentos se continúan aplicando los conceptos y métodos aprendidos en las anteriores prácticas relacionados con los aspectos metrológicos (estimación de la incertidumbre de medición) y de aseguramiento de la calidad de las mediciones.

EXPERIMENTO # 7: Plano inclinado.

EXPERIMENTO # 8: Máquinas simples.

EXPERIMENTO # 9: Segunda ley de Newton.

EXPERIMENTO # 10 - EXAMEN FINAL - Medición de la gravedad utilizando un péndulo simple. En esta práctica se pretenden los siguientes objetivos:

- Que los estudiantes determinen experimentalmente el valor de la gravedad dentro del laboratorio con su respectiva incertidumbre de medición, utilizando un péndulo simple oscilando con pequeñas amplitudes.
- Que los estudiantes demuestren de manera práctica que están en capacidad de expresar correctamente sus resultados experimentales.

Se plantea este experimento de manera abierta como un examen final, no se indica el procedimiento a seguir y se da libertad al estudiante para diseñarlo e implementarlo, cumpliendo con las normas metrológica y expresando el valor de la gravedad medida indirectamente, con su correspondiente incertidumbre de medición.

*A. Metodología para realizar la estimación de la incertidumbre de medición.*

De acuerdo al vocabulario internacional de metrología (VIM), el cual se encuentra en Colombia en la norma GTC-

ISO/IEC 99 [4] incertidumbre de medición es el “Parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando”; y se puede afirmar que se estima a partir de parámetros de dispersión. En la Fig. 1 se realiza un análisis de las diferentes causas por las cuales una medida no puede ser perfecta. Cuando se realizan experimentos de física se pueden presentar dos tipos de medidas:

- *Medida Directa:* Una medida es directa cuando se obtiene observando directamente el indicador de un instrumento diseñado para medir magnitudes de la misma naturaleza (por ejemplo, cuando se mide tensión eléctrica por medio de un multímetro digital) [5].
- *Medida Indirecta:* Las medidas indirectas son aquellas que son resultado de emplear una expresión matemática que implica operaciones con cantidades físicas que fueron medidas directamente. La incertidumbre en medidas indirectas proviene necesariamente de la incertidumbre obtenida por medio de las variables involucradas que se midieron por método directo. Contrario al caso de las medidas directas, la determinación de la incertidumbre en medidas indirectas es un proceso más complejo que puede llegar a involucrar aspectos de cálculo diferencial, debido a que es inevitable la presencia de correlaciones entre las variables de entrada [6].

Por medio de diagramas de flujo (Fig. 2, 3, 4) se presenta la versión diseñada e implementada de la metodología general para estimar la incertidumbre de medición. Esta metodología está basada en la GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement) [1]. Los términos estadísticos utilizados están acordes con la norma NTC 2062-1 [7].

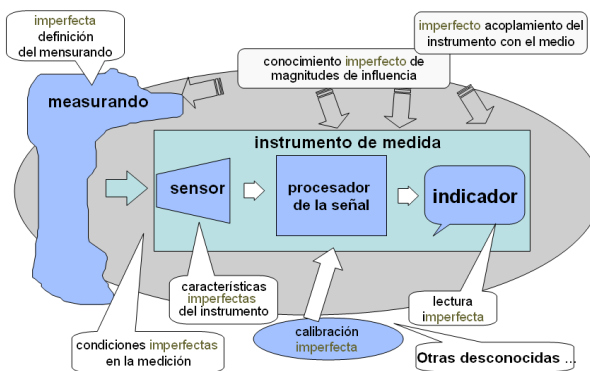


Fig. 1. Causas de la incertidumbre en la medida.

1) *Casos de incertidumbre estándar tipo B (Diagrama de flujo: Fig. 1)*

CASO 1. Si la incertidumbre de un valor x se obtiene a partir de la especificación de un fabricante, o de un certificado de calibración, un manual u otra fuente externa al procedimiento de medición en que se indique que este es un

múltiplo de la desviación estándar,  $U_x$  se obtiene simplemente de dividir la incertidumbre dada entre el factor multiplicativo.

CASO 2. La especificación de incertidumbre de un elemento de medición se indica respecto de un nivel de confianza (90%, 95%, 99%, etc.) se puede asumir, (salvo indicación contraria), que esta ha sido estimada en base a una distribución normal, por lo tanto podemos hallar la incertidumbre estándar dividiendo por el factor de Student (t) correspondiente (ver Fig. 2).

CASO 3. La especificación de incertidumbre no es explícita sino que se da un límite máximo para el error del instrumento. Esto implica que el comportamiento del instrumento tiene características de una distribución tipo rectangular o uniforme dentro de unos límites establecidos en la ecuación 1.

$$U_{B(xi)} = \frac{\text{Especificaciones}}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

CASO 4. Incertidumbre asociada a la resolución de la indicación de un instrumento de medición. La incertidumbre básica asociada a este problema se puede obtener considerando que la información que se pueda contener en la porción menos significativa de la indicación de un instrumento, tiene una función de distribución tipo rectangular.

En el caso de una indicación digital, la incertidumbre básica corresponde a la ecuación 2:

$$U_{B(xi)} = \frac{\text{Re resolución}}{2\sqrt{3}} \quad (2)$$

En el caso de una indicación analógica la incertidumbre básica corresponde a la ecuación 3:

$$U_{B(xi)} = \frac{\text{Re resolución}}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

2) *Nota para la estimación del número de grados de libertad (Diagrama de flujo: Fig. 3)*

El número efectivo de grados de libertad de cada distribución se determina teniendo en cuenta los criterios de la figura 5.

3) *Nota para el teorema del límite central (Diagrama de flujo: Fig. 4) [8]*

La importancia de este teorema radica en que es el soporte de que en el mundo real los sistemas de medición son la combinación de diferentes magnitudes de entrada caracterizadas con distintas distribuciones de probabilidad (ver Fig. 6) para conformar la función de la magnitud (Y) de interés, caracterizada por una distribución aproximadamente normal, y poder obtener así, su incertidumbre estándar compuesta junto con su número efectivo de grados de libertad (vef).

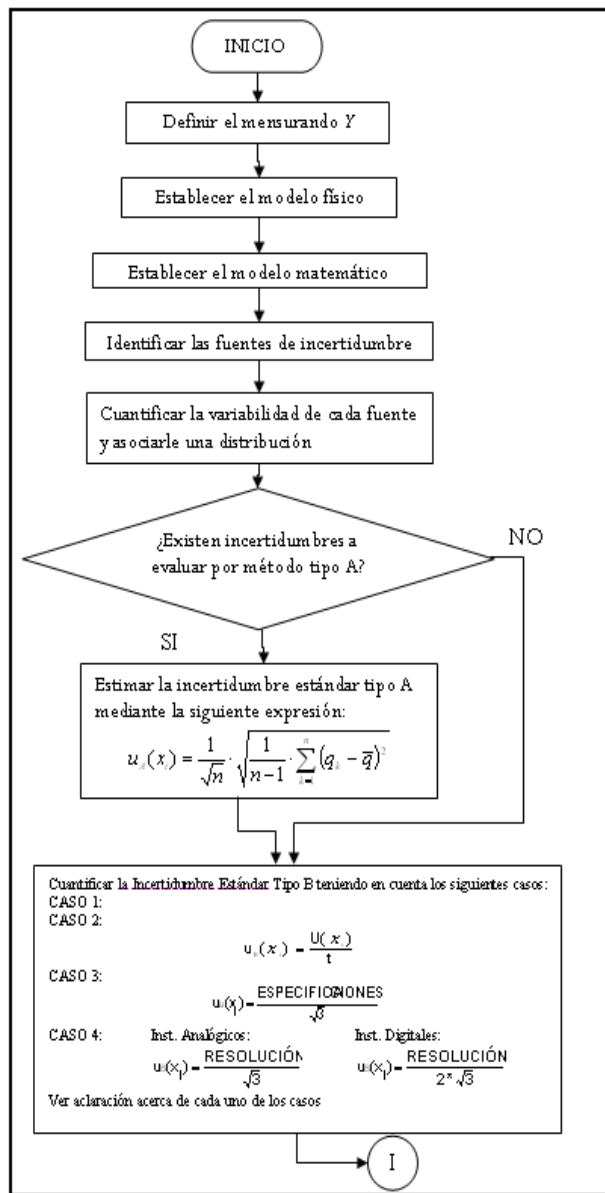


Fig. 2. Sección del diagrama de flujo que especifica la metodología a seguir.

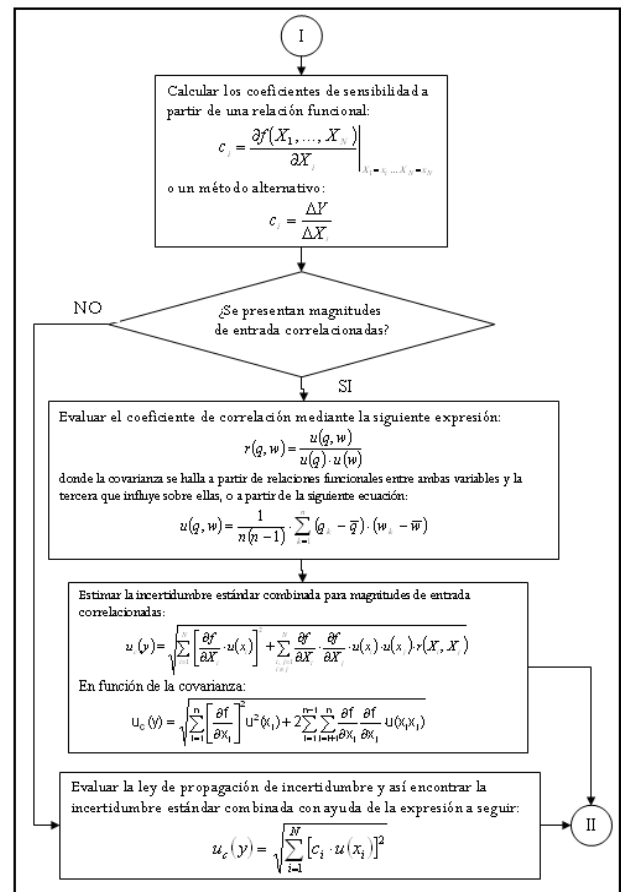


Fig. 3. Segunda sección del método.

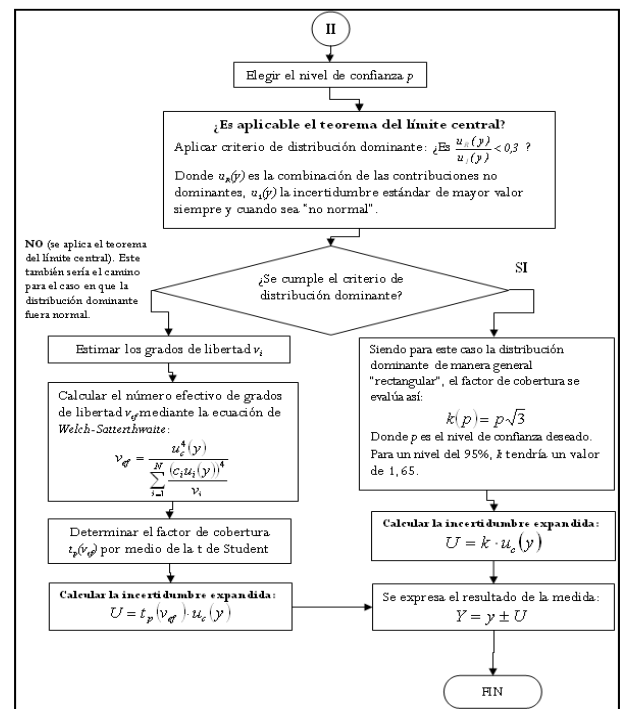


Fig. 4. Tercera sección del método (incertidumbre expandida).

$\gamma_{ief} = n - 1$ . Evaluaciones Tipo A con una restricción.  
 $\gamma_{ief} = n - m$ . Evaluaciones Tipo A con m restricciones.  
 $\gamma_{ief} = \text{infinito}$ . Cuando se apliquen distribuciones rectangulares.  
 $\gamma_{ief} = 50$ . Si se deduce de una distribución normal para la cual se han tomado suficiente número de datos.

Fig. 5. Criterios para la estimación del número efectivo de grados de libertad.

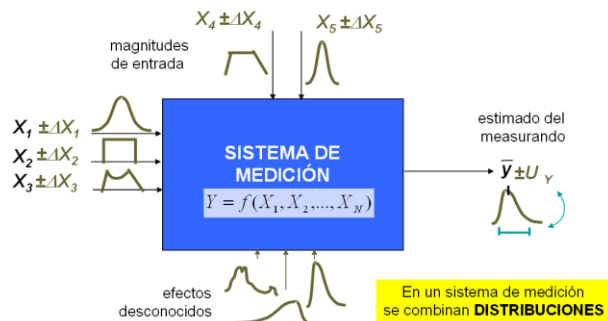


Fig. 6. Mediciones en el mundo real.

#### IV. CONCLUSIONES

- Con base en la metodología implementada en el laboratorio de física dirigido a los estudiantes de ingeniería de la UTP, se ha logrado realizar un trabajo de aseguramiento de la calidad de las mediciones experimentales y de esta manera introducir al estudiante dentro del contexto de la calidad y de la normalización, que dentro del campo de la medida (metrología) tienen incidencia en los procesos de investigación, desarrollo, producción y comercio a nivel global.
- Se ha logrado que los estudiantes de ingeniería desde sus primeros cursos de laboratorio de física adquieran y estén en capacidad de aplicar, una metodología que permite realizar el aseguramiento de la calidad de sus mediciones dentro de sus experimentos; esta metodología está basada en normas internacionales que hoy en día están asimiladas por nuestro país, dentro de todo el contexto metrológico que existe actualmente a nivel global. La propuesta que se presenta es también de tipo didáctico, ya que se expone toda una metodología que permite formar a los estudiantes de ingenierías, tecnologías y ciencias básicas dentro de este contexto; donde la mejor manera de hacerlo es dentro de las prácticas del laboratorio de física que estos estudiantes reciben desde sus primeros semestres. La propuesta didáctica expuesta, está basada en el curso preliminar de laboratorio de física I, con base en unas guías estructuradas para fundamentar a los estudiantes en el cuidado de sus medidas, en su expresión correcta, así como en el manejo adecuado de los instrumentos de medida. Los autores diseñaron e

implementaron estas guías y las correspondientes a los cursos de laboratorio de física II, y III, las cuales no se presentan en este trabajo; en ellas se pretende continuar utilizando toda la fundamentación adquirida desde el laboratorio de física I, del tal manera que se adquiera toda una cultura metrológica, que además de ser utilizada en las prácticas de laboratorio, se implemente por parte de sus estudiantes en todas sus asignaturas de tipo experimental, en sus trabajos de grado y en su vida profesional.

- Formar a los futuros ingenieros no solamente dentro de los aspectos físicos fundamentales sino también dentro del aseguramiento de la calidad de sus mediciones en el laboratorio de física, los prepara para el mundo real, para un mundo globalizado y estandarizado con base en normas de calidad, exigidas por los países con base en convenios y tratados de libre comercio internacional, en los cuales la calidad de las mediciones es de primordial importancia.

#### REFERENCIAS

- [1] Instituto colombiano de normas técnicas y certificación. Norma GTC 51: Guía para la expresión de Incertidumbre en las Mediciones. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1997.178 p.
- [2] Joint committee for guides in metrology (Francia). Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [Archivo PDF en línea]. Sèvres: JCGM, 2008. 132 p. Disponible en Internet: (URL: [http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf)).
- [3] Instituto colombiano de normas técnicas y certificación. Norma NTC-ISO/IEC 17025: Requisitos Generales de Competencia de Laboratorios de Ensayo y Calibración. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2005. 35 p.
- [4] Instituto colombiano de normas técnicas y certificación. GTC-ISO/IEC 99, Vocabulario. Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales, generales y términos asociados (VIM) 2009. 52 p.
- [5] Llamosa R, Luis Enrique; Gómez E, José del C; y Ramírez B, Andrés Felipe. Metodología para la estimación de la incertidumbre en mediciones directas, Scientia et Technica Año XV, No 41, Mayo de 2009, p 384-389. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.
- [6] Llamosa R, Luis Enrique; Gómez E, José del C; y Ramírez B, Andrés Felipe. Diseño de un procedimiento para el cálculo de incertidumbre en mediciones indirectas. Scientia et Technica Año XV, No 42, agosto de 2009, p 187-192. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.
- [7] Instituto colombiano de normas técnicas y certificación. Norma NTC 2062-1. Estadística. Vocabulario y símbolos. Parte 1. Términos estadísticos generales y términos utilizados en el cálculo de probabilidades- 2008. 60 p.
- [8] Llamosa R, Luis Enrique; Gómez E, José del C; Utilización del teorema del límite central en el cálculo de la incertidumbre de medición. Scientia et Technica Año XV, No 43, diciembre de 2009, p. 288 – 293. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.