

Metodología para la enseñanza de la estimación de la incertidumbre de medición en experimentos de física

Teaching methodology for the estimation of uncertainty of measurement in physics experiments

Jennifer A. Cano U., Milton H. Medina B., Luis Enrique Llamosa R.

Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

jellamo@utp.edu.co

mmedina@utpe.edu.co

Resumen— Se presenta en este trabajo una metodología genérica para la enseñanza de la estimación de la incertidumbre de medición de resultados experimentales. Esta metodología ha sido diseñada e implementada en los laboratorios de física que imparte el departamento de física de la Universidad Tecnológica de Pereira con el objetivo de crear una cultura alrededor de este tema. La metodología se basa en la norma GTC-51 “Guía para la expresión de la incertidumbre en las mediciones” basada en normas internacionales que actualmente son utilizadas a nivel científico, industrial y legal. Esta norma ha sido trabajada con profundidad por el grupo de electrofisiología del departamento de física de la UTP, en su línea de investigación en metrología, logrando implementarla por medio de los proyectos cofinanciados por COLCIENCIAS. Como resultado de esta experiencia se ha generado toda una cultura que propende por la expresión de los resultados experimentales con la correspondiente estimación de su incertidumbre de medición, partiendo desde el laboratorio de física I hasta los resultados que se obtienen en trabajos de grado y en desarrollos experimentales obtenidos por los grupos de investigación de nuestro departamento.

Palabras clave— Enseñanza, incertidumbre de medición, física experimental s, metrología.

Abstract— A generic methodology for teaching the estimation of measurement uncertainty of experimental results is presented. This methodology has been designed and implemented in the laboratories of physics that gives the Department of Physics of the Universidad Tecnológica de Pereira, with the aim of creating a culture around this issue. The methodology is based on the GTC-51 standard, "Guide to the expression of uncertainty in measurement" based on international standards that are currently used in science, industry and legal. This standard has been worked out thoroughly by the electrophysiology group in the Department of Physics of the UTP, in its research in metrology, able to implement through projects co-financed by COLCIENCIAS. As a result of this experience has generated a culture that promotes the expression of experimental results with the

corresponding estimate of measurement uncertainty, starting from the Laboratory of Physics I to the experimental results obtained in undergraduate work and research developments made by the research groups of our department.

Key Word — Education, measurement uncertainty, experimental physics, metrology.

I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta una metodología didáctica y organizada para la enseñanza de la estimación de la incertidumbre en mediciones experimentales realizadas en los laboratorios de Física; se justifica este trabajo en el hecho de que actualmente en las universidades, en los cursos experimentales de física no se le da la debida importancia a la estimación de la incertidumbre de medición o no se realiza de manera adecuada. Se debe tener en cuenta que la forma como se expresan los resultados de medidas deben seguir ciertas normas y reglas establecidas que hoy en día han sido adoptadas de manera global por la industria y la experimentación en general, para los cuales el manejo adecuado de los equipos de medida y la expresión adecuada de sus mediciones es de primordial importancia; por esta razón surge la necesidad de crear e implementar una cultura metrológica tanto en los estudiantes como en los profesores universitarios y de secundaria. Al realizar una medición determinada, es indispensable comprender que ésta jamás será absolutamente exacta, es decir, el resultado de la medida no coincidirá exactamente con el valor verdadero del mensurando. Para expresar de manera correcta el resultado de una medición, es necesario calcular su respectiva incertidumbre asociada. El presente trabajo toma como referencia las publicaciones más destacadas a nivel nacional e internacional en el tema del cálculo de incertidumbre de la medición [1,2,3]. Tomando como base esta teoría se expone un procedimiento que reúne los lineamientos más importantes para la adecuada expresión de la incertidumbre en las medidas; este procedimiento se viene

aplicando con diferentes niveles en los cursos de laboratorio de física de nuestra universidad.

De acuerdo al vocabulario internacional de metrología (VIM), el cual se encuentra en Colombia en la norma NTC-2194 [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. Existen diferentes causas por lo cual una medida no puede ser perfecta (ver fig. 1).

Cuando se realizan experimentos de física se pueden presentar dos tipos de medidas:

Medida Directa: Una medida es directa cuando se obtiene observando directamente en un instrumento diseñado para medir magnitudes de la misma naturaleza (por ejemplo, cuando se mide tensión eléctrica por medio de un multímetro digital). Por lo general las medidas directas son el caso más común al momento de hacerse una medición.

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. Entre los casos clásicos para la medición indirecta de variables eléctricas están el de la resistencia eléctrica y el de potencia eléctrica a través de mediciones directas de tensión y corriente eléctricas. 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.

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 gubernamental dirigida a crear condiciones favorables para la generación de conocimiento científico y tecnológico nacionales) que tenían entre sus objetivos principales

disponer de un laboratorio de metrología en las áreas de calibración de equipos de medidas eléctricas y equipo electromédico, este objetivo se ha logrado; en la actualidad se dispone de laboratorios de metrología acreditado en las áreas de variables eléctricas y de metrología electromédica que presta 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. DISEÑO DEL PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

La metodología implementada en las guías del laboratorio de física, consiste en inicialmente familiarizar al estudiante con los conceptos introductorios de la medida tales como: medida directa, medida indirecta, exactitud, tolerancia, error, incertidumbre etc. Para continuar, con las reglas de expresión de resultados experimentales, es decir, cifras significativas y redondeo de números, y finalmente introducir al estudiante en el punto central de este trabajo, enseñar el tratamiento estadístico de errores 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 el cálculo y el aprendizaje; posteriormente se aplican los conceptos y procedimientos adquiridos en la realización de los experimentos de física respectivos.

Por medio de un diagrama de flujo se presenta nuestra versión 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] guía de carácter internacional que tiene el propósito de unificar criterios para la estimación de la incertidumbre de medición (figuras 2, 3, 4).

A. Casos de incertidumbre estándar tipo B (Diagrama de flujo: Figura 2)

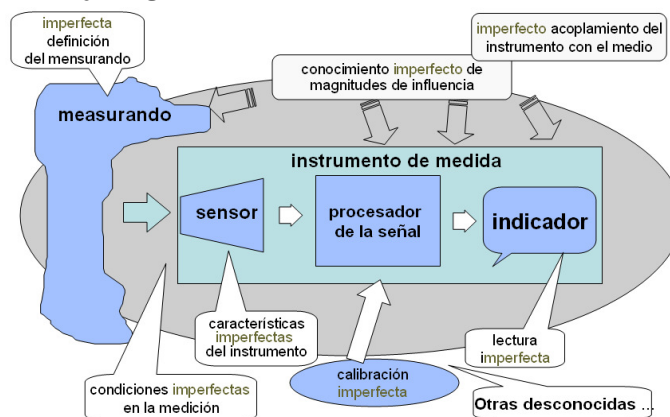


Figura 1 Causas de la incertidumbre en la medida.

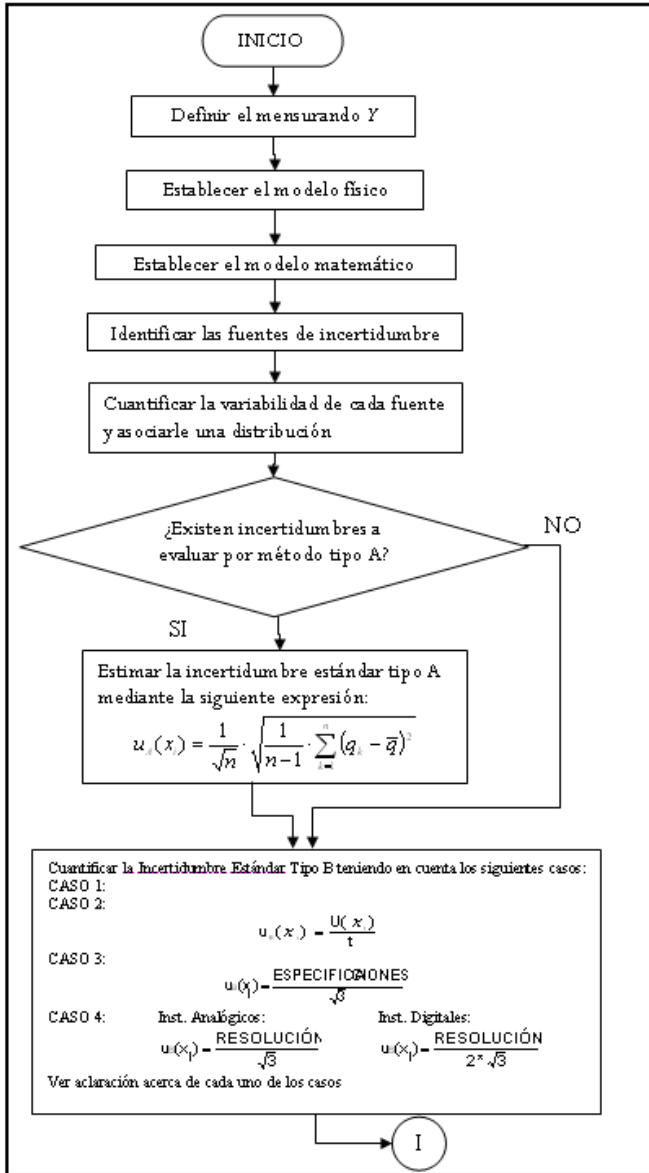


Figura 2 Sección del diagrama de flujo que especifica la metodología a seguir.

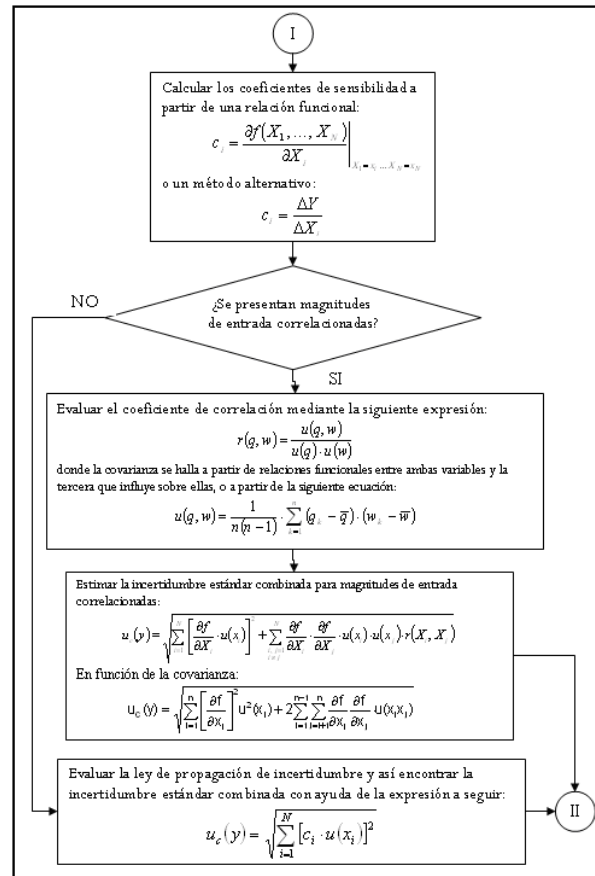
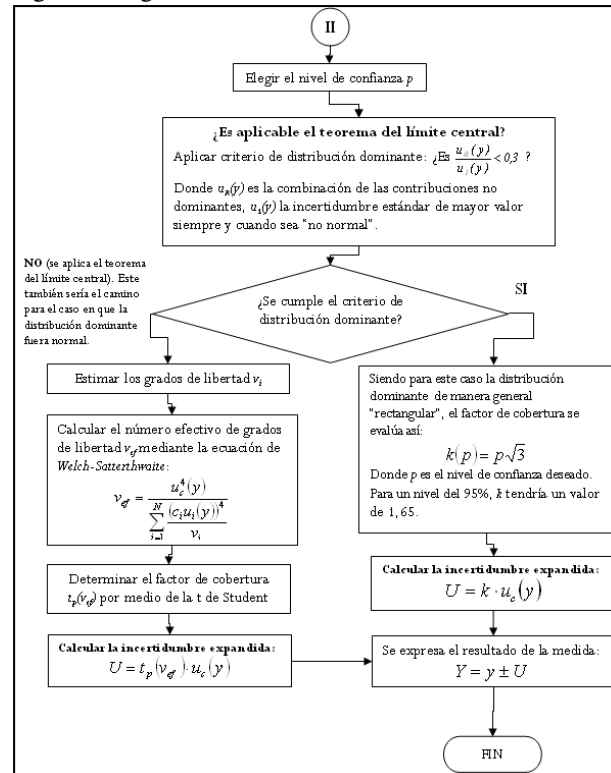


Figura 3 Segunda sección del método.



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:

$$u(x_i) = \frac{U(x_i)}{t}$$

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. Para este tipo de distribución, la incertidumbre estándar se estima así: $U_B(X_i) = \text{ESPECIFICACIONES}/\sqrt{3}$

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: $U_B(x_i) = \text{RESOLUCIÓN}/2\sqrt{3}$

En el caso de una indicación analógica la incertidumbre básica corresponde a: $U_B(x_i) = \text{RESOLUCIÓN}/\sqrt{3}$.

B. Nota para la estimación del número de grados de libertad (Diagrama de flujo: figura 3):

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

$\gamma_{ief} = n - 1$. 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.

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

C. Nota para el teorema del límite central (Diagrama de flujo: figura 4):

En la práctica, la mayoría de los experimentos de medición tienen características que los aproximan fácilmente a una condición de normalidad. De acuerdo al *Teorema del Límite Central*, para que la distribución de probabilidad de un resultado de medición tienda al modelo normal se requiere:

- Que la relación funcional f que define al mensurando Y sea una función lineal de otras magnitudes;
- Que la distribución de probabilidad de las magnitudes que definen al mensurando Y sea del tipo normal.

c) También se puede aceptar que la distribución de probabilidad de algunas magnitudes de definición sea rectangular sólo si éstas últimas son en número menor que las del tipo normal, y si la desviación estándar experimental del proceso de medición se estima a partir de un conjunto grande de observaciones. Sin embargo, aun cuando la distribución de probabilidad de las magnitudes de definición no sea normal, el Teorema del Límite Central permite aproximar la distribución de probabilidad del mensurando Y por una distribución normal. Si una variable Y se

puede expresar como $Y = \sum \zeta_i X_i$, y toda función X_i se puede caracterizar mediante una distribución de probabilidad normal, entonces Y estará también caracterizada por una distribución normal. Ahora, cuando algunas de las X_i no se pueden caracterizar mediante una distribución normal, la función Y podrá ser también caracterizada por una distribución aproximadamente normal en virtud del Teorema del Límite Central: “La distribución de Y es aproximadamente normal con un valor esperado $\varepsilon(Y) = \zeta \cdot \varepsilon(X_i)$ y varianza $(Y) = \sum \zeta_i^2 \sigma^2(X_i)$ donde $\varepsilon(X_i)$ y $\sigma^2(X_i)$ son el valor esperado de X_i y su varianza respectivamente, siempre y cuando los X_i sean independientes y $\sigma^2(Y)$ sea mucho mayor que cualquier componente $\zeta_i^2 \sigma^2(X_i)$ de una función X_i no caracterizada por una distribución normal.” [2]

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 figuras 6 y 7) 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 (ν_{ef}). De este teorema se puede deducir que la distribución de probabilidad de la variable Y estará más próxima a una distribución normal cuanto mayor sea el número de componentes X_i y cuanto más cercanos sean entre sí los valores de los $\zeta_i^2 \sigma^2(X_i)$. Por otro lado, se necesitarán menos funciones X_i cuanto más próximas de la normal sean sus respectivas distribuciones.

De manera general el criterio para la utilización del teorema del límite central se encuentra explicado en el diagrama de flujo de la figura 4.

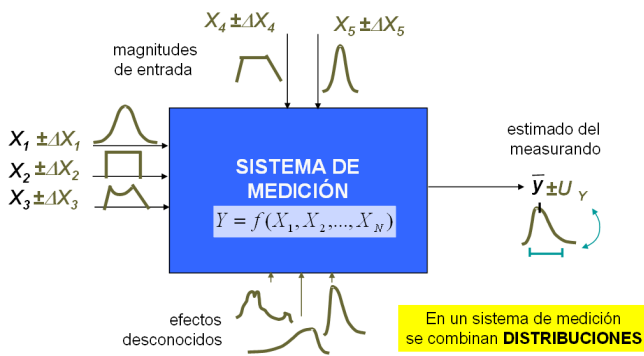


Figura 6 Mediciones en el mundo real.

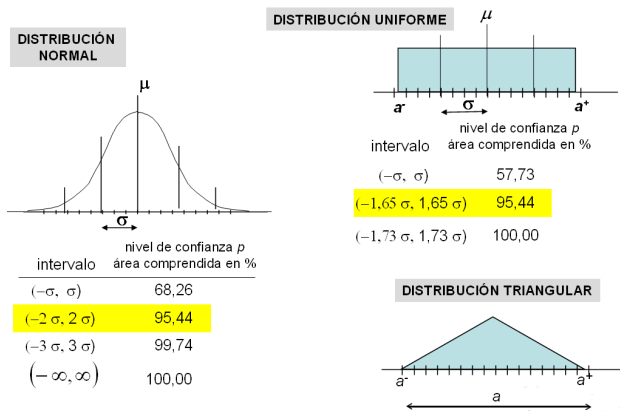


Figura 7 Distribuciones frecuentes.

IV. CONCLUSIONES

Generalmente, en los laboratorios de experimentación tanto de las empresas como de las universidades, se hacen mediciones sin realizar el cálculo de la correspondiente incertidumbre de medición. En muchos artículos especializados a nivel nacional se puede observar todavía, cómo experimentalistas reportan medidas sin incertidumbre de medición. La mayor parte de la investigación experimental en Colombia adolece de esta falla; las medidas se realizan con instrumentos que se han comprado y nunca más vuelven a ser calibrados. En general, se puede decir que en nuestro país son muy pocos los experimentalistas que saben reportar sus medidas.

Esperamos que este artículo sirva para crear cultura metrológica entre los experimentalistas, para ello es indispensable que los estudiantes de nuestras universidades desde sus cursos de laboratorio de física empiecen a realizar una estimación de la incertidumbre de sus medidas. La preparación de los profesores es fundamental, ellos deben tener la información necesaria para formar a los estudiantes en estos aspectos, para lo cual es indispensable comunicar los fundamentos de la medición incluida la estimación de la incertidumbre de medición de una manera

acorde con el nivel de los estudiantes, lo cual es posible desde el laboratorio de física I con la metodología apropiada.

REFERENCIAS

[1] 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).

[2] EUROPEAN CO-OPERATION FOR ACCREDITATION (Francia). EA 4/02: Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration [Archivo PDF en línea]. París: EA, 1999. 79 p. Disponible en Internet: (URL: <http://www.european-accreditation.org/n1/doc/EA-4-02.pdf>).

[3] 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.

[4] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Norma NTC 2194: Vocabulario de Términos Básicos y Generales en Metrología. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1997.33 p.