

## PROCEDIMIENTO ESTIMACIÓN INCERTIDUMBRE EN UN SISTEMA DE MEDIDA CASO MAGNETÓMETRO HALL

*Procedure uncertainty in a system of measures case Magnetometers Hall*

### RESUMEN

En este trabajo se presenta un método para estimar el valor de incertidumbre asociada a la medida por un sistema de medición electrónico, como componente metrológico en el proceso de diseño y construcción de un sistema de medida genérico. En este caso específico, para un magnetómetro Hall de precisión. El método usado es por comparación con un equipo patrón. También se determina el error en la medida aportado por los diferentes componentes del sistema de acondicionamiento en el sistema de medida. El procedimiento plantea un valor para la incertidumbre en la medida de campo magnético de 0.8 % y un error de 0.2 %. El error es aportado por los diferentes componentes del sistema de instrumentación.

**PALABRAS CLAVES:** Efecto hall, Error, incertidumbre.

### ABSTRACT

*This paper presents a method for estimating the value of uncertainty associated with the measure by an electronic measurement system, as metrological component in the process of design and construction of a measuring system generic. In this specific case of a precision magnetometer Hall. The method used is by comparison with a team pattern. It also determines the error as provided by the different components of conditioning system of measurement system. The procedure poses a value for the uncertainty to the extent of the magnetic field of 0.8% and 0.2% error. The mistake is made by the different components of the system instrumentation.*

**KEYWORDS:** Effect hall, Error, uncertainty.

### JAVIER I. TORRES OSORIO.

Ingeniero Electricista M.Sc  
Profesor asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
oscur@utp.edu.co

### HECTOR J. FERNANDEZ P.

Estudiante X Semestre  
Ingeniería Física  
Universidad Tecnológica de Pereira  
hjfpif@hotmail.com

### BEATRIZ CRUZ MUÑOZ

Física, Ph.D  
Profesora Asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
bcruz@utp.edu.co

### 1. INTRODUCCIÓN

En diferentes ámbitos ya sean académicos o de investigación, en los que se presente la necesidad de implementar sistemas de medición, el diseñador enfrenta la tarea de determinar el valor de incertidumbre asociado a la medición. En este caso la necesidad específica es determinar el valor de la incertidumbre, aportado a la medida de campo magnético (H) en un magnetómetro Hall.

En la actualidad se presentan muy pocos trabajos a nivel nacional referentes a la estimación de la incertidumbre asociada a la medición de campo magnético, lo que dificulta el procedimiento.

La norma NTC 17025 no especifica el método a seguir respecto al cálculo de dicha incertidumbre, ya que este puede ser por comparación respecto a un equipo patrón [1], [2] o si se puede realizar desagregando el sistema de medición respecto a las incertidumbres que aporta cada elemento, desde el transductor hasta la conversión analógica digital (A/D).

En este trabajo se presenta el cálculo de incertidumbre de un magnetómetro Hall, implementado, usando un sensor

Hall de precisión *FW Bell BH701* (0 -3,0 T), este cálculo se realizó por el método de comparación con un equipo patrón (magnetómetro Phywe).

### 2. FUNDAMENTO TEORICO.

Un sistema de medida es la combinación de dos o más elementos, que asignan un número a una propiedad o cualidad de un evento, de tal forma que la describa [3]. Este número presenta asociado a él una incertidumbre que es el parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurado [1].

### 3. MÉTODO Y MATERIALES.

El procedimiento para determinar el aporte de la incertidumbre asociada a una medida en el caso de un magnetómetro se puede extrapolar a otros sistemas de medida en los cuales la medida se realiza de forma directa. El método para estimar el valor de la incertidumbre que presenta el magnetómetro implementado se fundamenta en la aplicación de las normas NTC-ISO 17025 y GTC-051 [4],[5] en este caso se estima la incertidumbre de medida teniendo en cuenta

las especificaciones y la resolución del sistema de medida completo sin ahondar en cada uno de los elementos internos del equipo, para esto es necesario comparar el sistema de medida con un patrón, así se pueden estimar las especificaciones del equipo diseñado y saber que tan trazable es.

**3.1 Calculo de incertidumbre.** El método para la estimación de incertidumbre en un sistema de medición se debe escoger entre dos opciones: Comparación con equipo patrón o por aporte de incertidumbre de cada componente (transductor, filtrado, amplificación y conversión analoga-digital), este último es poco aplicable ya que requiere de una fuente de campo magnético calibrada y de equipos para cada etapa.

En la entrada tenemos la transducción de una señal de campo magnético a un voltaje, denominado voltaje Hall ( $V_h$ ). Para obtener un valor de campo magnético de salida  $H$ , se debe realizar el modelado del procedimiento de medición. Adicional a esto se debe determinar los tipos de incertidumbre tipo A y tipo B.

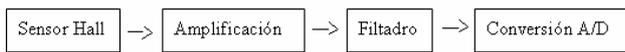


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de medición.

Sistema de medición (SM)



Figura 2. Este tipo de medición es directa

**3.2 Modelado del procedimiento de medición.** El valor del campo magnético entregado por el sistema de medición se da por medio de la siguiente ecuación:

$$H = \frac{V_h * B_s}{\beta_T * V_{ho}} \tag{1}$$

Esta es la ecuación que relaciona el campo magnético  $H$  con el voltaje  $V_h$  entregado por el sensor.

La única magnitud de entrada es  $V_h$  la que es la entregada por el sistema de medición,  $B_s$  y  $V_{ho}$  indican la tasa de conversión de Voltaje Hall de salida con el campo magnético  $B_s$  ( $86.32 \mu\text{V/mT}$ ) y  $\beta_T$  es el factor de amplificación de la señal durante su procesamiento.

Ahora se debe tener en cuenta los aportes por calibración del equipo, frente a un patrón y corrección por resolución. Generando la siguiente expresión:

$$H = \frac{V_h * B_s}{\beta_T * V_{ho}} + C_R + C_P \tag{2}$$

donde:

$C_P$ = Corrección del patrón

$C_R$ = Corrección por resolución

En la evaluación  $C_R$  y  $C_P$  las correcciones no aporta al valor del estimado de la medición, pero si son fuente de incertidumbre tipo B.

**3.2.1 Incertidumbres tipo A y tipo B.**

**Incertidumbre tipo A.** Debido a factores estadísticos, en la que la desviación estándar aporta el valor de incertidumbre asociado a cada una de las mediciones y su valor promedio.

- Desviación estándar

$$u_{\bar{H}} = S_m = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (H_k - \bar{H})^2}{n(n-1)}} \tag{3}$$

dnnde:

$H$ = cada una de las mediciones y  $K=1, 2, 3 \dots n$

$$\bar{H} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n H_k = 283 \text{ mT} \tag{4}$$

$n$  = numero de mediciones.

$n= 5$  mediciones.

$$u_{\bar{H}} = S_m = 0.387 \text{ mT} \quad \text{Distribución Normal}$$

- **Incertidumbre tipo B.** Las fuentes de incertidumbre de este tipo están dadas por las especificaciones del equipo de medición y por la resolución del instrumento y se calculan de la forma siguiente:

- o **Especificaciones del sistema de medida (E).** La especificación de incertidumbre no es explicita, sino que se da un limite máximo para el error del instrumento. Esto implica que el comportamiento del instrumento tiene características de una distribución tipo rectangular o uniforme dentro unos limites establecidos. Para este tipo de distribución, a incertidumbre estándar se estima así:

$$u_B(H1) = \frac{E}{\sqrt{3}} \tag{3}$$

Especificaciones  $0.5\% \pm 50 \mu\text{T}$

Asignando los valores queda:

$$u_B(H1) = \frac{\frac{0.5\% \times 283 \text{ mT}}{100\%} + 1 \times 0.5 \text{ mT}}{\sqrt{3}} \tag{4}$$

$$u_{B(H_1)} = 1.10 \text{ mT}$$

Distribución Rectangular

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 [6].

- **Resolución del sistema de medida (R).** La incertidumbre asociada a la resolución corresponde a la sensibilidad del dígito menos significativo arrojado por el sistema de medida.

$$u_{B(H_2)} = \frac{R}{2 * \sqrt{3}} \tag{5}$$

Resolución = 1 mT

$$u_{B(H_2)} = 0.289 \text{ mT}$$

Distribución Rectangular

Aparte se debe garantizar que los instrumentos trabajen dentro de las especificaciones dadas por sus fabricantes en lo que compete a condiciones ambientales.

**Nota:** Los requerimientos de funcionamiento de todos los instrumentos que componen el sistema de medición bajo condiciones ambientales están controlados.

|  |           |
|--|-----------|
| Temperatura  | 20-25 °C  |
| Humedad Relativa   | 60-80 %   |
| Off a celulares y equipos ajenos a la medición que aporten campo magnético ajeno a la medición | OK        |
| Presión Atmosférica  | 60-80 psi |

Tabla 1. Condiciones ambientales del laboratorio donde se tomaran las mediciones

• **Cálculo de los coeficientes de sensibilidad**

Las derivadas parciales de la función con respecto a cada variable se conocen como coeficientes de sensibilidad y generalmente se denotan de forma abreviada como C<sub>i</sub>.

Estos son la variación diferencial en la estimación de salida generada por una variación diferencial en una estimación de entrada dividida por la variación en la estimación de entrada.

$$C_i = \frac{\partial f}{\partial X_i} \tag{6}$$

$$f = H = \frac{V_h * B_s}{\beta_T * V_{ho}} + C_R + C_P \tag{7}$$

Donde:

- X<sub>1</sub> = V<sub>h</sub>
- X<sub>2</sub> = C<sub>R</sub>
- X<sub>3</sub> = C<sub>P</sub>

Por lo tanto:

$$C_1 = 2.89 \text{ E } -4 \quad C_2 = 1 \quad C_3 = 1$$

• **Contribución**

La contribución es el aporte de cada coeficiente de sensibilidad a la incertidumbre correspondiente.

$$U_i(f) = C_1 * U(\bar{H}) + C_2 * U(H_1) + C_3 * U(H_2) \tag{8}$$

$$U_i(f) = 2.89 \text{ E } -4 * 0.387 \text{ (mT)} + 1 * 1.10 \text{ (mT)} + 1 * 0.289 \text{ (mT)} \tag{9}$$

$$U_i(f) = 1.38 \text{ mT}$$

• **Incertidumbre estándar combinada**

Esta se obtiene combinando apropiadamente las incertidumbres estándar de los estimados de las magnitudes de entrada. (Ley de propagación de incertidumbres) [6].

Como no hay correlación entre las magnitudes de entrada, se calcula mediante la expresión:

$$U_c(f) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial X_i} \right]^2 U^2(X_i)} \tag{7}$$

$$u_C(y) = \sqrt{(2.89 \times 10^{-4})^2 * (0.387)^2 + (1)^2 * (1.10)^2 + (1)^2 * (0.289)^2}$$

$$u_C(y) = 1.13 \text{ mT}$$

• **Numero efectivo de grados de libertad  $\gamma_{ief}$**

Hallar los grados efectivos de libertad permite encontrar el factor de cobertura que agregado a la incertidumbre combinada da como resultado la incertidumbre expandida que es el objetivo.

El número de grados de libertad correspondiente a la incertidumbre tipo A, para distribución normal viene dado por:

$$\gamma_{ief} = n - 1 = 6 - 1 = 5$$

Evaluación tipo B con distribución rectangular

Las dos distribuciones restantes son rectangulares, por lo tanto el número efectivo de grados de libertad es infinito

$$\gamma_{2\text{ef}} = \gamma_{3\text{ef}} = \infty$$

Los grados efectivos de libertad del estimado de salida H se obtienen combinando los grados de libertad de las magnitudes de entrada. Esa combinación se obtiene a través de la llamada fórmula de Welch-Satterthwaite que tiene la forma siguiente:

$$\gamma_{ef} = \frac{u_C^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{\gamma_i}} \quad (10)$$

$$\gamma_{ef} = \frac{(1.42\text{mT})^4}{\frac{(1.12\text{mT})^4}{5} + \frac{(1.39\text{mT})^4}{\infty} + \frac{(0.289\text{mT})^4}{\infty}} \quad (11)$$

$$\gamma_{ef} = 12.92$$

- Factor de cobertura k correspondiente al número efectivo de grados de libertad encontrado y el nivel de confianza deseado.

De la tabla presente en [6] que relaciona los valores de los grados de libertad, con el nivel de confianza, tenemos:

Para un nivel de confianza de 95.45% y 12.92 grados de libertad se tiene:

$$\text{El valor de } k=2$$

- Cálculo de la incertidumbre expandida (U)**  
Aunque la incertidumbre estándar combinada puede utilizarse para expresar la incertidumbre del resultado de una medición en algunas aplicaciones comerciales, industriales y regulatorias es necesario ofrecer una medida de la incertidumbre que represente a un intervalo alrededor del resultado de la medición dentro del cual puedan encontrarse los valores que razonablemente pueden ser atribuidos al mensurando con un alto nivel de confianza.

$$U = U_c * k \quad (12)$$

$$U = 1.13 * 2 \quad (13)$$

$$U = 2.26 \text{ mT}$$

$$U = 0.8 \%$$

Esta incertidumbre expandida corresponde a todo el proceso de medición involucrando las de tipo A y tipo B y es la que representa la calidad de la medición.

**3.3 Cálculo de errores.** A continuación se calcula los errores presentes en el funcionamiento del equipo por diferentes aspectos unos físicos y otros por especificaciones de los elementos que lo conforman.

**3.3.1 Error por posicionamiento sensor Hall (E<sub>H</sub>)**

Para la expresión del error total se tomara el peor escenario, con una inclinación de 3 grados.

| Angulo (°) | Error (%) |
|------------|-----------|
| 0          | 0         |
| 1          | 0.015     |
| 2          | 0.061     |
| 3          | 0.137     |

Tabla 2. Valores de error aportados por el transductor en condiciones de rotación respecto al vector de campo magnético H.

**3.3.2 Error en la tarjeta de adquisición de datos**

$$E_A = 150 \text{ ppm} = 0.015\%$$

**3.3.3 Error en la transducción.** Este es un valor entregado por el fabricante el reporte de calibración.

$$E_T = 0.105\%$$

**3.3.4 Error por resolución o cuantización.** Este es el error entregado por el fabricante de la tarjeta de adquisición de datos (DAQ). Y es un valor preponderante frente al entregado por el del transductor, razón por la que se selecciona este y no el del transductor.

$$E_R = 0.0015\%$$

El error total se calcula mediante la expresión

$$E_{total} = \sqrt{(E_H)^2 + (E_A)^2 + (E_T)^2 + (E_R)^2} \quad (14)$$

$$E_{total} = 0.2\%$$

- 4. RESULTADOS** Este método para determinación de incertidumbre en la medida se determino que el proceso de medición arrojó una incertidumbre en la medición de 0.8 % entregándole una excelente calidad a la medición. El error encontrado por los elementos que conforman el sistema de medición es del 0.2 %.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El método desarrollado por contribución de cada parte del canal de acondicionamiento es un método muy complejo y arroja valores similares al método desarrollado en este documento.
- El método para cálculo de incertidumbre por aporte de incertidumbre de cada componente (transductor, filtrado, amplificación y conversión analógica-digital), es poco aplicable dado que para hacer estas estimaciones de incertidumbre se debe contar con un instrumento patrón para cada etapa siendo poco práctico y teniendo valores de incertidumbre que no aportan significativamente a la calidad de la medición.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. G. Alatorre Moreno y M. A. Escobar V. Centro Nacional de Metrología, Div. de Mediciones Electromagnéticas. México.
- [2] M. A. Escobar y M. P. García. Laboratorio de Mediciones Magnéticas / División de Mediciones Electromagnéticas Centro Nacional de Metrología (CENAM), México.
- [3] R. Pallás. Sensores y acondicionadores de señal. 3<sup>a</sup> Ed. Marcombo 2001, p. 473.
- [4] Norma GTC-51 “guía para la expresión de Incertidumbre en las mediciones” Colombia.
- [5] NTC-ISO-17025 Requisitos generales de competencias de laboratorios de ensayos y calibración.
- [6] L. Llamosa, G. Meza y D. Rodríguez. Aspectos metrológicos fundamentales para la acreditación de un laboratorio de patronamiento eléctrico. Universidad Tecnológica de Pereira. 2005. p 220.

### Bibliografía adicional

- Applied Research in Uncertainty. Modeling and Analysis. Edited by Nii O. Attah-Okine. University of Delaware, Newark, Delaware, USA and Bilal M. Ayub University of Maryland, College Park, Maryland, USA. Print ©2005 Springer Science + Business Media, Inc.
- S. G. Rabinovich. Measurement Errors and Uncertainties. Theory and Practice. Third Edition. 2005 Springer Science and Media, Inc. AIP Press is an imprint of Springer Science and Media, Inc.