

CRITERIOS PARA LA INSTRUMENTACIÓN DE UN MAGNETÓMETRO HALL EN CORRIENTE CONTINUA.

Direct Current Hall Magnetometer Intrumentation Criteria

RESUMEN

En este trabajo se presentan los criterios de diseño para la implementación de un medidor de intensidad de campo magnético, mediante un sensor Hall, es decir un magnetómetro Hall, teniendo en cuenta criterios instrumentales y metrológicos. En el proceso de medición de campo magnético se presenta incertidumbre tipo B, debida a la transducción, amplificación, filtrado y conversión A/D. Se incorporan consideraciones que el instrumentador debe tener en cuenta para reducir el índice de incertidumbre, haciendo el proceso de medición más eficiente. Se realizó la instrumentación del magnetómetro Hall y se redujo el índice de incertidumbre en un 5%, correspondiente a uno de los factores de error.

PALABRAS CLAVES: *Sensor Hall, magnetómetro, señal, magnética.*

ABSTRACT

In this work, there are presented the criteria for design and implementation of a magnetic field intensity meter, through a Hall sensor, i.e. a Hall magnetometer, bearing in mind the instrumental and metrological criteria. In the process of measuring a magnetic field, the uncertainty of kind B is presented, due to the transduction, magnification, filtering and A/D conversion. Additionally, there are included some considerations to have into account by the instrumental experimentalist in order to reduce the uncertainty index, making the measurement process even more efficient. Besides, the instrumentation of a Hall magnetometer was done and the uncertainty index was reduced by a 5%, corresponding to one of the error factors.

KEYWORDS: *sensor Hall, magnetometer, signal, magnetic.*

1. INTRODUCCIÓN

En diferentes aplicaciones que se dan en laboratorios ya sean: eléctricos, física o química experimental, entre otros es una necesidad la medición de campo magnético, con una alta precisión. Para este procedimiento se cuenta con tres tipos de sensores: Magnetómetro de resonancia magnética (RMN), magnetómetro Fluxgate y magnetómetro de efecto Hall. Presentando cada una ventajas y desventajas entre ellos, dadas las aplicaciones. Durante las diferentes etapas del proceso de medición se incorporan factores que pueden aumentar la incertidumbre en la medida; la completa identificación de estos factores y su tratamiento mejorarán el resultado final. En la actualidad se presentan muy pocos trabajos referentes a la instrumentación de un sensor Hall desde el punto de vista instrumental y metrológico. La implementación de un medidor de campo magnético por medio de un sensor Hall cuenta básicamente con dos etapas: el preprocesamiento de la señal transducida y la conversión de las unidades de la señal (en voltios) que resulta de la transducción a un valor de campo magnético que puede ser en Gauss (G) o en Tesla (T). Esta última

JAVIER IGNACIO TORRES O.

Ingeniero Electricista M.Sc (C)
Profesor asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
oscurito@utp.edu.co

BEATRIZ CRUZ MUÑOZ

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

CARLOS FELIPE VILLEGAS S.

Tecnólogo electrónico
Estudiante Ingeniería Electrónica.
Universidad Tecnológica de Pereira
cafevisi@ohm.utp.edu.co

tarea se puede realizar por medio de un microcontrolador para presentarse el resultado por pantalla de cristal liquido o usando un computador con la implementación de un programa.

En este trabajo se presenta la implementación de un magnetómetro, usando un sensor Hall de precisión *FW Bell BH701* (0 -3,0 T) y se propone un método para disminuir el error en la medición.

2. EL SENSOR DE EFECTO HALL

Este es un transductor que en presencia de campo magnético genera una diferencia de potencial como señal de salida, la cual es proporcional al valor del campo magnético en el que se encuentra.

La señal de salida es el voltaje Hall (V_h), que está definido por la expresión [1]:

$$V_h = \frac{k}{d} IB \quad (1)$$

donde: d es el espesor del semiconductor del sensor, I la corriente de control del sensor, B el campo magnético

externo y $K=I/qn$ es el coeficiente de Hall en m^3/C . El coeficiente es definido por la naturaleza del material, que puede ser de material conductor o semiconductor. Usualmente es una lámina monolítica que contiene acondicionadores de señal [1].

La relación del campo magnético externo con el voltaje Hall entregado por el sensor plantea un valor de voltaje de salida (V_{ho}) en Voltios para un valor de campo magnético determinado (B_S) en Tesla (T) o Gauss (G) y define la precisión del transductor. Por ejemplo $1mV/mT$.

Se debe tener en cuenta que $1.0 G = 1.0 \times 10^{-4} T$

La función que relaciona el voltaje Hall con el valor de campo magnético medido es:

$$B = \frac{V_h * B_S}{\beta_T * V_{ho}} \quad (2)$$

donde β_T es el valor de amplificación con que se afecte la amplitud de la señal de voltaje, durante el preprocesamiento de la señal.

2.1 Descripción física y condiciones de operación. Este sensor presenta cuatro (4) conductores, dos (2) para la corriente de control y dos (2) para la salida de voltaje (V_h).

En cuanto a las condiciones de operación se debe tener en cuenta, que la sensibilidad del sensor es función de la corriente de control. (Si se dobla esta corriente de control se duplica la sensibilidad) [2].

2.2 Ventajas y desventajas del sensor Hall. Las ventajas que el sensor Hall presenta sobre otros elementos de medición de campo magnético son: emplea configuraciones para flujo axial y transversal, compensa campos magnéticos ambientales, compensa errores de offset que se generan internamente y mide geometrías complejas. Entre las desventajas están: no es lineal en todo el intervalo de medición, es sensible a la temperatura y presenta múltiples fuentes de error tales como:

- Tensión Hall de offset V_m
- El campo magnético terrestre.
- Fuentes magnéticas cercanas.
- La alineación entre la normal del sensor y las líneas de flujo.

Dadas estas fuentes de error se debe asociar una incertidumbre tipo B a la medida.

Para el error por la desviación, respecto a la línea perpendicular al flujo magnético, se tiene la ecuación (3) [2], que genera los valores de la tabla 1.

$$\varepsilon = (1 - \cos \theta) * 100 \quad (3)$$

donde θ es el ángulo entre la normal del sensor y las líneas de flujo.

| Ángulo (°) | Error (%) |
|------------|-----------|
| 0 | 0 |
| 1 | 0,015 |
| 2 | 0,061 |
| 3 | 0,137 |

Tabla 1. Error en la medición debido a la desviación del sensor, respecto a la perpendicular del flujo magnético.

Tomado de: Consideraciones técnicas de medición de flujo magnético en corriente continua (C.C) [2]

3. CRITERIOS PARA LA INSTRUMENTACIÓN DE UN SENSOR HALL.

3.1 Elección del tipo sensor de efecto Hall.

Básicamente la elección del sensor Hall depende de las magnitudes máxima y mínima de campo magnético que se desee sensor; pero también se debe tener en cuenta: nivel de incertidumbre, si el campo magnético es tangencial o axial y dimensiones del espacio donde se realizará la medición.

Las especificaciones del sensor, que se deben considerar son:

- Intervalo de trabajo típico en C.C (0,1 μT – 30 T).
- Aplicación.
- Resolución (0,1 - 10) μT .
- Incertidumbre (0,05 -2)
- Estabilidad $\pm 1\%$ por año.

3.2 Criterios para la elección de elementos para el preprocesamiento del sensor Hall.

El preprocesamiento del sensor Hall presenta dos tipos de criterios: uno instrumental y otro metrológico; ambos redundan en las características requeridas por los elementos usados en el preprocesamiento de la señal transducida.

El requerimiento instrumental se refiere a las condiciones para el preprocesamiento de la señal y el metrológico se refiere a:

- El mínimo valor confiable de campo magnético relacionado con la resolución de la tarjeta de adquisición de datos (DAQ).
- Al máximo valor de campo magnético relacionado con el voltaje de referencia (V_{ref}) de la DAQ.
- La reducción y tratamiento de las fuentes de incertidumbre tipo B.

Para esto se diseña un circuito, que cumpla con las especificaciones del fabricante del sensor; para así obtener señales dentro del intervalo requerido por la DAQ o por un microcontrolador. Para este fin se debe tener: filtrado, amplificación y una fuente de corriente para el suministro de la corriente de control (sensores de bajo rango la tienen incorporada). Este conjunto debe acondicionar la señal para ser captada y digitalizada por la DAQ.

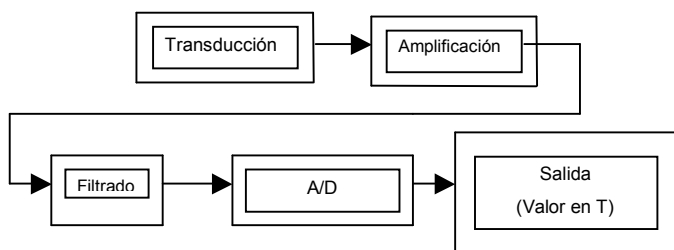


Figura 1. Diagrama de bloques del proceso medición de campo magnético en C.C.

3.2.1 Fuente de corriente: ésta suministra la corriente de control que debe ser muy estable para no afectar la sensibilidad del sensor. La estabilidad de esta fuente a su vez, depende de la estabilidad en la señal de voltaje usada para alimentar los dispositivos de estado sólido que conforman la fuente de corriente; por lo que instrumentar un sensor Hall para un campo magnético alto, puede presentar una dificultad adicional.

3.2.2 Filtrado: Para determinar el tipo de filtro y la frecuencia de corte requerida, se debe realizar un análisis de la señal. Este proceso se desarrolla en la sección (5.1).

3.2.3 Amplificación. Para la selección del amplificador y el factor de amplificación se debe considerar que el valor que entrega el amplificador no supere el voltaje de referencia del convertidor análogo digital (A/D).

3.2.4 Conversión análoga digital A/D. Durante la etapa de digitalización se presenta el error de cuantización, que define la resolución, y el error por resolución (ϵ_c) que se tendrá en la medida para diferentes voltajes de referencia [3] y que está descrito por la siguiente ecuación:

$$\epsilon_c = \frac{V_{ref}}{2^n} \tag{4}$$

donde V_{ref} es el valor seleccionado y n el número de bits, ambos de la DAQ.

3.2.5 Selección del rango de operación del magnetómetro. Se debe contar con que para definir la mínima estimación confiable de campo magnético esperado (B_{min}), se presenta un compromiso entre la resolución de la DAQ, para cada voltaje de referencia y el factor de amplificación seleccionado para el preprocesamiento de la señal, pues para mejorar la resolución se asume un V_{ref} pequeño (1.0 V) y esto limita la selección del factor de amplificación y por ende el mejoramiento de la relación señal a ruido (S/R).

Al definir el valor máximo de campo magnético con que se desee diseñar el magnetómetro se debe tomar un V_{ref} alto, definiéndose el límite para los valores ϵ_c y la mínima estimación confiable de campo magnético.

Por lo tanto, dependiendo de la aplicación, se afectará uno de los dos extremos del rango para mejorar el otro, es decir un valor alto de campo magnético presentará una resolución mas baja y viceversa.

La relación del campo magnético externo con el voltaje Hall entregado por el sensor plantea un valor de voltaje de salida (V_{ho}) en voltios para un valor de campo magnético determinado (B_s) en Gauss o Tesla y define la precisión del transductor. La función que relaciona el voltaje Hall con el valor de campo magnético medido, se presenta en la ecuación (2).

Si se desea visualizar el valor de la medición por pantalla de cristal liquido se presenta un caso similar; pues bajo esta condición se debe instalar un microcontrolador y para este elemento se debe contar con un valor de voltaje mínimo de entrada para su operación, debido esto al número de bits con que cuente el convertor A/D del microcontrolador.

4. ESTIMACIÓN DEL ERROR.

Para este efecto se presenta la estimación del error en el proceso de medición de campo magnético se tiene: el error dado en la transducción (ϵ_t) dado por el fabricante del sensor Hall, el error por desviación (ϵ_d), el error por amplificación (ϵ_β) y el error por resolución (ϵ_R) debido al error de cuantización, dados por:

$$\epsilon_R = \frac{\epsilon_c}{2\sqrt{3}} \tag{5}$$

$$\epsilon_\beta = \left| \frac{V_o - V_p}{V_p} \right| * 100 \tag{6}$$

Siendo V_o el valor del voltaje de salida del canal de preproceso y V_p el voltaje patrón con que se alimenta este canal.

Por lo tanto, el error en la medida está dado por:

$$\epsilon_T = \sqrt{\epsilon_t^2 + \epsilon_\beta^2 + \epsilon_d^2 + \epsilon_R^2} \tag{7}$$

4.1 Tratamiento del error en el magnetómetro.

Buscando minimizar el valor de la incertidumbre en la medida, siendo esta incertidumbre tipo B y generada durante la transducción, el preprocesamiento y digitalización, se debe tener en cuenta que al convertir el valor del V_h en Voltios (V) a un valor de campo magnético en Tesla (T) (ecuación 2), no siendo el valor β del amplificador el único a tener en cuenta, sino el efecto de todo el canal (amplificación, filtrado y conversión A/D). Pues si en teoría el filtro se diseña con una ganancia de uno (1) en la realidad esto puede diferir, generando una desviación respecto al valor de B (ver ecuación 2); y adicional a esto, está el error de cuantización durante la conversión A/D. Por lo que se considera que se deben hacer pruebas con el canal de

preproceso: amplificación, filtrado y conversión A/D; para determinar que tanto han afectado el filtrado y la conversión A/D al factor β y no adicionar una fuente de error en la medida. El nuevo factor a tener en cuenta es β_T que involucra toda la variación en amplitud de la señal en todo el preproceso. Este valor β_T puede ser determinado al suministrarle un valor de voltaje en la entrada al canal y contrastarlo con el valor obtenido por pantalla, usando $V_o/V_i = \beta_T$

5. IMPLEMENTACIÓN DE UN MAGNETÓMETRO DE PRECISIÓN EN C.C.

Se realizó la instrumentación de un sensor Hall para la medición de la magnitud de intensidad de campo magnético, con un sensor Hall *FW Bell BH701*, que presenta un rango de funcionamiento de (0,0 a 3,0) T, con una tasa de conversión de $86,32 \mu\text{V/mT}$ y un error en la transducción (ϵ_t) de 0,105%, según reporte de calibración suministrado por el fabricante. Estos valores se cumplen si la corriente de control suministrada es de 100 mA.

Con los criterios definidos en el numeral anterior, se diseñó un circuito que cumple con las especificaciones del fabricante para obtener señales dentro del intervalo adecuado para ser tomadas por un conversor análogo digital.

5.1 Análisis de la señal Hall (V_h). Esta señal es el producto de la transducción de campo magnético en una señal de voltaje. La señal de salida del transductor tiene las componentes frecuenciales inferiores a 20 Hz, se observa presencia de interferencia de señal de red y no se notan otras componentes de ruido adicionales de importancia (ver figura 2).

Esta señal tiene una amplitud máxima de 25,9 mV para un campo sensado de 3,0 T y un valor de 12,1 mV para el campo máximo de 1,4 T generado por el electroimán Phylatex (el cual es el equipo usado para generar dicho campo).

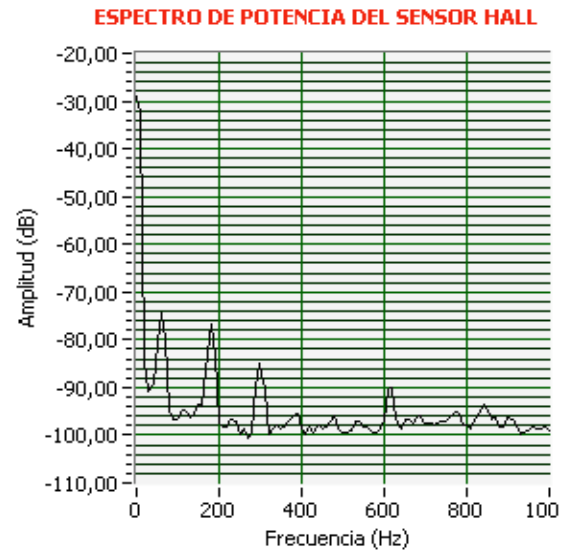


Figura 2. Espectro de potencia de la señal V_{ho} .

5.2 Preprocesamiento de la señal de campo magnético.

Para el preprocesamiento de esta señal se cuenta con: fuente de corriente, amplificación y filtrado.

5.2.1 Fuente de corriente. El fabricante del sensor recomienda que la corriente esté entre 100 mA y 300 mA, y que se use una fuente fabricada por ellos incrementando el costo del proceso. Por esto se implementó en el laboratorio una fuente de corriente de 100 mA.

5.2.2 Filtrado. El filtrado se realiza por medio de una aproximación Butterworth pasa bajo de orden 4, arquitectura Sallen key, con frecuencia de corte en 0.5 Hz, seleccionada al analizar la curva de la figura 2, el factor de amplificación se diseñó con $\beta=1$ pero se determinó por medio de mediciones que es de 1,05.

5.2.3 Amplificación. Se cuenta con un amplificador de instrumentación AD620, con un factor de amplificación $\beta = 40$. Para la selección de β se realizó el análisis definido en la sección (3.2) obteniendo de este proceso los resultados consignados en las tablas (2 y 3)

Para la selección del amplificador y el factor de amplificación β se debe considerar, que durante el proceso de digitalización se presenta el error de cuantización, que para diferentes voltajes de referencia está determinado en la tabla (2), que contiene también el mínimo valor confiable de campo magnético que el sensor puede medir para cada voltaje de referencia.

Por lo tanto, para definir la mínima estimación confiable de campo magnético esperado se presenta un compromiso entre: la resolución de la DAQ para cada voltaje de referencia y el factor de amplificación seleccionado para el preprocesamiento de esta señal. Además, se debe determinar el factor de amplificación

acertado para la mínima y máxima estimación de campo magnético confiable que se espere (ver tabla 3).

| Voltaje Ref (V) | Factor β_{max} | Rango máximo de campo magnético (mT) |
|-----------------|----------------------|--------------------------------------|
| 1,0 | 10 | 1000 |
| 5,0 | 50 | |
| 10,0 | 100 | |
| 1,0 | 8 | 1400 |
| 5,0 | 40 | |
| 10,0 | 80 | |
| 1,0 | 3,0 | 3000 |
| 5,0 | 18 | |
| 10,0 | 30 | |

Tabla 2. Factor de amplificación β para cada valor máximo de campo magnético.

| Voltaje Ref (V) | Resolución (μV) | Mínimo valor confiable de campo magnético (mT) |
|-----------------|------------------------|--|
| 1,0 | 15,26 | 0,177 |
| 5,0 | 76,30 | 0,884 |
| 10,0 | 152,57 | 1,770 |

Tabla 3. Valores mínimos confiables de campo magnético y resolución, por el proceso de digitalización de la DAQ de 16 bits.

Por medio del análisis de los valores expuestos en las tablas (2 y 3) se tiene el criterio necesario para determinar el factor de amplificación y el voltaje de referencia de la DAQ, usados para los valores con que se desee diseñar el magnetómetro.

| B_{max} (mT) | B_{min} (mT) | V_{ref} (V) | β | β_T |
|----------------|----------------|---------------|---------|-----------|
| 1400 | 0.88 | 5.0 | 40 | 42 |

Tabla 4. Características del magnetómetro Hall implementado

5.2.4 Sistema de adquisición de datos: La interfaz con el computador se realiza mediante una tarjeta de adquisición *NI PCI-6220 (DAQ) de National Instrument*.

5.2.5 Software de aplicación: Se desarrolló en lenguaje LabVIEW versión 7.1 (National Instrument), que procesa la señal del sensor, y hace los cálculos propios para hacer la conversión a unidades de campo magnético en Teslas, visualizando el resultado en una pantalla.

5.3 Estimación del error. El valor de error obtenido, para la medida entregada por el magnetómetro implementado, es ± 70 mT, para un valor de campo máximo de 1400 mT, que corresponde a (4.834 ± 0.242) V

$$\epsilon_d = 0.137 \%$$

$$\epsilon_t = 0.105 \%$$

$$\epsilon_\beta = 5.00 \%$$

$$\epsilon_t = 2,87 \times 10^{-9} V$$

$$\epsilon_T = 0.242 V$$

El valor ϵ_β es obtenido si se tiene en cuenta sólo el β del amplificador. Por otro lado si se cuenta con el valor de β_T , ϵ_β se cancela disminuyendo el error en la medición a ± 2.42 mT

6. CONCLUSIONES.

La asignación inadecuada del valor β a cambio de β_T afecta considerablemente la exactitud de la medida. Estando esto en detrimento de la inversión realizada al adquirir un sensor de precisión.

Es importante contar con un sistema de posicionamiento para minimizar el error por rotación del sensor.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. A. Khazan. Transducer and their elements, dising and aplication, page 572. Prentice Hall, 1994.
- [2]. M. P. García y M. A. "Escobar. Consideraciones técnicas de medición de flujo magnético en corriente continua (C.C)" *In Proc. 2005 CENAM Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica.Metrología*
- [3]. Texas Instrument. Signal conditioning for industrial sigma-delta converters. In *Proceedings, Seminario WEB*, www.ti.com, 2003. Texas Instrument.

Bibliografía adicional

- [4]. J. H. López. *Et all*. Aplicación de labVIEW como instrumento virtual en mediciones de campo magnético (gaussimetro). *Revista Colombiana de física*, Vol. 37, No. 1, 2005
- [5]. L. E. Llamosa, L. G. Meza y D. L. Rodríguez. Aspectos metrológicos fundamentales para acreditación de un laboratorio de patronamiento eléctrico. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira 2005.
- [6]. E. E. Reber, R. L. Mitchell, and C. J. Carter, "Oxygen absorption in the Earth's atmosphere," Aerospace Corp., Los Angeles, CA, Tech. Rep. TR-0200 (4230-46)-3, Nov. 1968