

Diseño e implementación de un sistema de caracterización para microsensores de efecto Hall

F. López-Huerta^a, G. Rojas-Nava^b, B. S. Soto-Cruz^c, and A. L. Herrera-May^a

^aCentro de Investigaciones en Micro y Nanotecnología,
Universidad Veracruzana, Boca del Río, Ver., México.

^bFacultad de Ciencias de la Electrónica, Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

^cPostgrado en Dispositivos Semiconductores, Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

Recibido el 25 de julio de 2012; aceptado el 25 de octubre de 2012

En este trabajo se presenta el diseño e integración de un sistema de caracterización eléctrica para microsensores de efecto Hall, el cual permite la detección y medición del campo magnético perpendicular a la superficie de los microsensores de efecto Hall. El sistema propuesto puede controlar y mantener la comunicación de la posición de la fuente de excitación y de la magnitud del campo magnético. Este sistema incluye un mecanismo de movimientos en la superficie θ -Z (dos grados de libertad), sensores, instrumentos electrónicos, una computadora, tarjetas de interfaz y una interfaz gráfica de usuario (IGU) implementada en Lab-View[®]. El posicionamiento del sistema se realizó por medio de dos motores, un motor paso a paso y un servomotor, los cuales efectúan los movimientos en la superficie θ -Z. El eje Z tiene una resolución de 0.03 cm mediante un motor paso a paso y el eje θ tiene una resolución de 1 cm que se obtiene con un servomotor. Como fuente de excitación se utilizó un magneto de Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB) que genera un campo magnético máximo de 100 mT. La detección del campo magnético se obtiene con los microsensores de efecto Hall, los cuales presentaron una respuesta lineal en el rango de 1 mT a 100 mT. Este sistema permite a través de una sola interfaz la detección del campo magnético perpendicular a la superficie del microsensor, así como el posicionamiento de la fuente de excitación en la superficie θ -Z. La interfaz gráfica de usuario tiene un ambiente de control de fácil acceso para el usuario final. Además, el sistema puede reconfigurarse para la caracterización de otro tipo de microsensores, al cambiar únicamente los módulos de excitación y detección. Esta versatilidad permitirá obtener un mayor tiempo de vida útil del sistema de caracterización.

Descriptores: Campo magnético; superficie θ -Z; microsensores de efecto Hall; interfaz gráfica de usuario.

This paper presents the design and integration of an electrical characterization system for Hall effect microsensors, which allows the detection and measurement of magnetic field perpendicular to the surface of the microsensors. The proposed system can control and maintain the communication of both the position of the excitation source and the magnitude of the magnetic field. This system includes a mechanism for surface movement θ -Z with two degrees of freedom, sensors, electronic instruments, a computer, interface cards and a graphical user interface (GUI) implemented in Lab-View[®]. The positioning of the system is made through two motors, a stepper motor, and a servomotor. Which perform the movements in the θ -Z surface. The Z axis has a resolution of 0.03 cm through a stepper motor and the θ axis has a resolution of 1 cm, which is obtained using a servomotor. As excitation source, we used neodymium iron boron (NdFeB) magnet, which has a magnetic field of 100 mT. The detection field is obtained with microsensors which had a response in the linear range of 1 mT to 100 mT. This system allows a single interface through the detection of magnetic field perpendicular to the surface of the microsensor, as well as the positioning of the excitation source in the θ -Z surface. The GUI has a control environment accessible to the end user. Furthermore, the system can be reconfigured for the characterization of other microsensors, changing only the excitation and detection modules. Its versatility will increment the life time of our system characterization.

Keywords: Magnetic field; θ -Z surface; Hall effect microsensors; graphical user interface.

PACS: 07.05. Hd; 07.10. Cm; 07.07. Hj

1. Introducción

En la actualidad, con el avance tecnológico, han surgido muchos sistemas e instrumentos capaces de facilitar las tareas o procesos que se realizan en diferentes áreas del conocimiento [1-4]. En particular los equipos de instrumentación electrónica nos permiten desarrollar interfaces de acuerdo a las necesidades particulares de cada sistema. Estas interfaces están diseñadas para que el usuario final tenga un ambiente amigable e intuitivo para la medición y control de todas las variables del entorno. Estos módulos de los equipos de instrumentación electrónica en conjunto con los protocolos de comunicación existentes para la interconexión de los instrumentos y la computadora (PC), ha permitido el desarrollo de

sistemas portátiles. En estos sistemas, la PC y el software desarrollado son el núcleo para las operaciones de medición y control de instrumentos de caracterización [5].

Aunque existe un importante desarrollo tecnológico y cantidad de instrumentos electrónicos, en muchos laboratorios no se cuenta con los recursos necesarios para comprar un sistema de medición comercial. En general, estos equipos están diseñados para cumplir con tareas específicas, en los cuales el usuario final debe adaptarse a los parámetros establecidos y no tiene la posibilidad de expandir o modificar las capacidades del sistema de medición [6-7]. Los bloques funcionales que componen estos sistemas tienen operaciones dedicadas debido a las características intrínsecas del sistema de medición. Por lo tanto, la adaptación de estos sistemas

para otras funciones es un proceso complicado; además, sus costos de producción son elevados y el precio final para el usuario es alto.

Para resolver este inconveniente, se pueden diseñar e implementar instrumentos virtuales basados en software, sensores, tarjetas de interfaz y PC, los cuales en conjunto realizan diferentes funciones o tareas, como si se tratara de un instrumento real. Esto permitiría ventajas importantes, las cuales incluyen la capacidad de almacenamiento de datos, protocolos de comunicación, nuevos sistemas operativos, la portabilidad del software mediante computadoras portátiles. Además, se incrementa la velocidad de procesamiento, almacenamiento y despliegue de datos. Debido a la estructuración abierta de las PCs, la funcionalidad del instrumento virtual es definida por el usuario. De esta forma, la instrumentación basada en software permite explotar todas las características de medición, procesamiento y despliegue de datos. Estos últimos instrumentos satisfacen las necesidades definidas por el usuario. Además, es posible reconfigurar los módulos de excitación y detección, cada vez que se requiera a diferencia de los sistemas de medición comerciales, las cuales tienen funciones establecidas por el vendedor.

Existen diferentes programas [8-9] para desarrollar el software de comunicación y control entre los diferentes bloques que conformaran el instrumento virtual, los cuales incluyen sensores, tarjetas de interfaz, PC e interfaz gráfica de usuario (IGU). Cada uno de estos programas presenta diferentes características y ventajas. Para nuestro trabajo se utilizó un lenguaje de programación gráfica (G) que contenga el conjunto de las librerías para los instrumentos de medición Lab-View® [10]. Esta herramienta ofrece una gran flexibilidad e eficacia para solucionar los problemas de automatización, control y medición.

Para el sistema de caracterización eléctrico para microsensores de efecto Hall fue implementado un instrumento virtual mediante el bus universal en serie (USB) [11]. Este instrumento obtiene de una sola interfaz el control de los módulos de excitación y medición, la adquisición de la señal y la visualización con la IGU. El sistema de caracterización eléctrico completo está formado por un mecanismo de movimientos en la superficie θ -Z, el cual tiene dos grados de libertad [12], una interfaz gráfica de usuario (IGU), y una fuente de excitación de Neodimio- Hierro-Boro (NdFeB). Esta fuente suministra el campo magnético perpendicular a los microsensores de efecto Hall. La caracterización eléctrica dentro del diseño de circuitos integrados (CI), sensores y microsensores es uno de los pasos fundamentales antes de la aplicación final. En esta caracterización se verifica el correcto funcionamiento de los dispositivos fabricados para obtener microsensores confiables, eficientes y reproducibles. Los resultados de la caracterización eléctrica son comparados con los obtenidos durante el proceso de diseño y simulación de los microsensores con los circuitos de lectura integrados en el mismo sustrato de silicio. Por esta razón, los equipos y/o sistemas de caracterización deberían ser reconfigurables, los cuales permitan realizar mediciones eléctricas sistemáticas y

reproducibles. Con estas mediciones se puede obtener mayor información del comportamiento global de los microsensores o microsistemas mediante el intercambio de los módulos de excitación y medición, respectivamente.

En este trabajo se implementó un sistema para la caracterización eléctrica de microsensores de efecto Hall, el cual permite la detección del campo magnético en un rango de 1 mT a 100 mT, perpendicular a la superficie de los microsensores. El sistema tiene un mecanismo de movimientos en la superficie θ -Z con una resolución en el eje Z de 0.03 cm y de 1 cm para el eje θ . Con la IGU se pueden controlar mediante una sola interfaz USB los módulos de excitación y detección del sistema. La funcionalidad del sistema se comprobó con la caracterización eléctrica de sensores de efecto Hall comerciales y los microsensores construidos bajo el proceso comercial metal óxido semiconductor complementario (CMOS) de 0.6 μm [13].

Este trabajo está organizado de la siguiente manera. En la Sec. 2 se describe el prototipo de caracterización, el cual consta de dos partes: el mecanismo de movimiento (hardware) para la superficie θ -Z y el software implementado para el almacenamiento, control, procesamiento y visualización de los resultados obtenidos del prototipo de caracterización. En la Sec. 3 se presenta el funcionamiento de los sensores de efecto Hall. En la Sec. 4 se describe los resultados obtenidos de las caracterizaciones eléctricas de los diferentes microsensores de efecto Hall. Finalmente, en la Sec. 5 se incluyen las conclusiones de este trabajo y se plantea el trabajo futuro.

2. Prototipo de caracterización

El prototipo de caracterización para la caracterización eléctrica está compuesto por hardware y software; el primero sirve

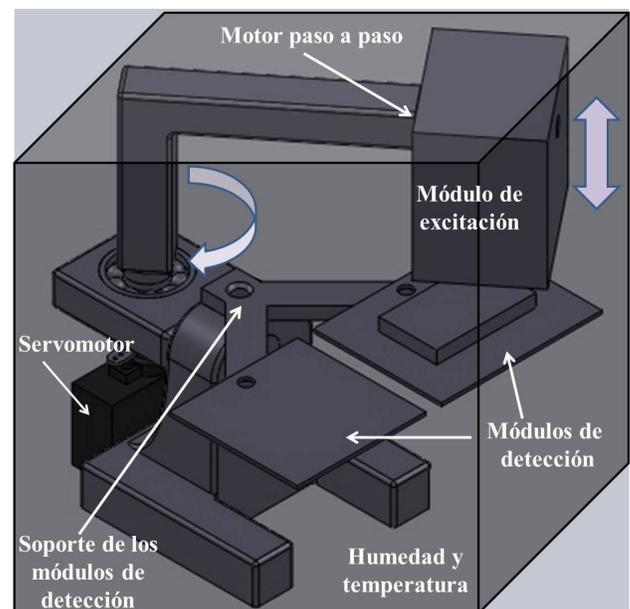


FIGURA 1. Prototipo para el mecanismo de movimientos en la superficie θ -Z.

para formar el sistema mecánico de movimientos en la superficie θ -Z de dos grados de libertad, el cual permite el soporte de los módulos de excitación y detección, respectivamente. En la dirección del eje Z se coloca el módulo que contendrá la fuente de excitación para alejar o acercar el campo magnético y los módulos de detección se rotan sobre el eje θ (Fig. 1). El software para controlar la rotación, traslación de los módulos de excitación y detección, respectivamente. Además, este software mantendrá la comunicación, almacenamiento y procesamiento de las caracterizaciones eléctricas de los microsensors.

2.1. Mecanismo de movimientos en la superficie θ -Z

En esta sección se describen las partes que forman el mecanismo de movimientos en la superficie θ -Z. Este sistema forma parte esencial para el instrumento virtual debido a que proporciona la base para colocar los módulos de excitación y detección. Cada una de las partes de sistema fue diseñada con el propósito de poder reemplazarlas, ya sea por desgaste de las piezas o para la adaptación del sistema a otras condiciones de medición (Fig. 2).

Para transmitir el movimiento a la parte mecánica se emplean 2 motores y una interfaz USB versión 2.0 [11]. Un servomotor síncrono de AC (alto rango dinámico, diseñado para par máximo) se empleará para la rotación del módulo de excitación en el eje θ . El control en este tipo de motores se puede realizar mediante la modulación por ancho de pulsos (PWM), la cual permite establecer una rotación específica sobre el eje θ . El control del servomotor se realiza mediante un microcontrolador 16F84A de Microchip® (Microchip Technology) [14] y mediante su rotación puede reconfigurarse con la modificación de una línea del código del FirmWare del microcontrolador. Con este código se puede establecer una posición determinada dentro del rango de 0 a 180°, con lo que se obtiene una adaptación rápida de los módulos de los sensores sujetos a caracterización.

Para la traslación del módulo de excitación, se utilizó un motor paso a paso debido a que tiene un elevado par de parada continua, propiedades de sincronismo, lazo abierto y alta resolución de posicionamiento. Este motor permite aproximar o alejar la fuente de excitación en la dirección del eje Z con respecto a los microsensors sujetos a caracterización. Debido a que el motor paso a paso empleado en este trabajo es del tipo bipolar, se utilizó el controlador CI L297 (Service & Technology) [15]. Este CI proporciona la secuencia adecuada para que el motor paso a paso gire en un sentido u en otro. La etapa de potencia para el controlador del motor paso a paso consiste en un puente H, para lo cual se empleó el CI L293D (Service & Technology) [15]. Debido a este puente, se puede separar la parte de control de la parte de potencia. Así, se evitan efectos parásitos (fugas de corriente y ruido) en la etapa de control del instrumento virtual. Esto permite una corriente de salida de 600 mA, la cual es una corriente suficiente para el control y la etapa de potencia del sistema de caracterización de microsensors de efecto Hall.

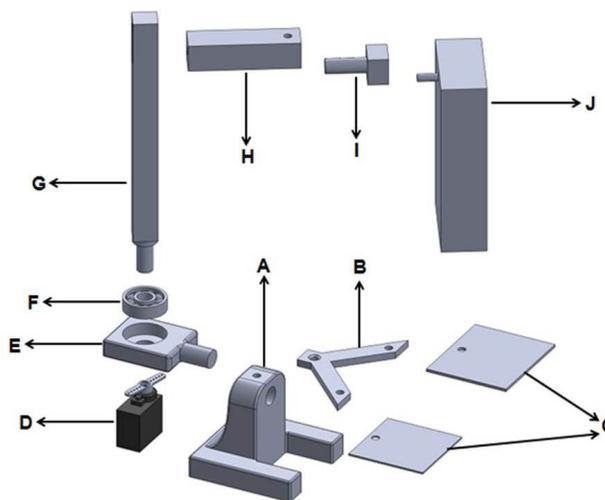


FIGURA 2. Partes que conforman el mecanismo de movimientos en la superficie θ -Z. A) Base principal, B) soporte de los módulos de detección, C) módulos de detección, D) servomotor, E) soporte del poste central, F) rodamiento, G) poste central, eje de rotación θ , H) poste Horizontal, I) extensión del poste horizontal, J) motor paso a paso parte superior y módulo de excitación, eje Z.

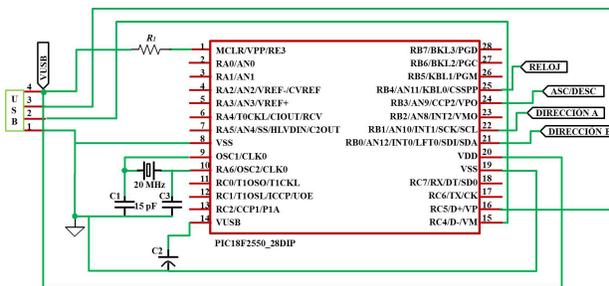


FIGURA 3. Esquemático para el control del servomotor USB.

Para la implementación de la interfaz USB, se empleó el microcontrolador 18F2550 (Fig. 3), que se conecta con el CI 16F84A. Este CI tiene un bloque dedicado para la comunicación USB. Su implementación no requiere de una electrónica asociada compleja. Únicamente, se necesita interconectar un cristal de cuarzo de 20 MHz y conectar un capacitor en el conector de entrada 14 para un sólo modo de energía, en donde toda la potencia del sistema se extrae del puerto USB. El microcontrolador recibe las instrucciones de la PC para activar el controlador del motor paso a paso o posicionar el servomotor en un ángulo determinado.

Todo el sistema de caracterización de microsensors de efecto Hall se encuentra en el interior de un cubo de acrílico (Fig. 4). En este contenedor se monitorea la temperatura y humedad durante las caracterizaciones eléctricas de los microsensors. El sensor utilizado es el SHT11 de Sensirion® [16], el cual consiste en un sensor digital de temperatura y humedad con una resolución de 14 bits y 12 bits, respectivamente. Las mediciones obtenidas de estos parámetros se mostraran en la pantalla de cristal líquido (LCD).

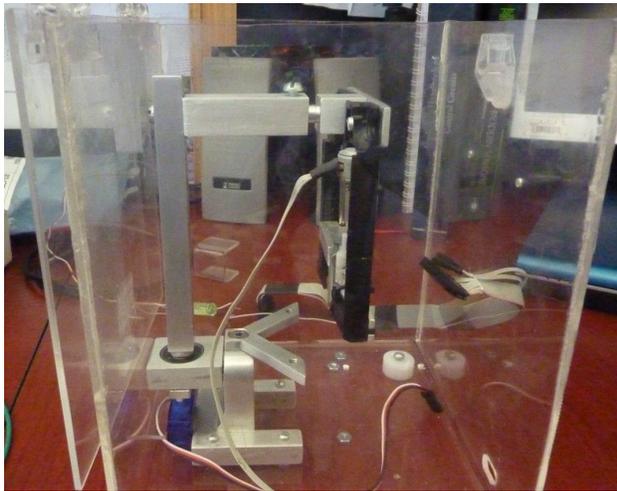


FIGURA 4. Sistema mecánico de movimientos en la superficie θ -Z dentro del cubo de acrílico para monitorear humedad y temperatura.

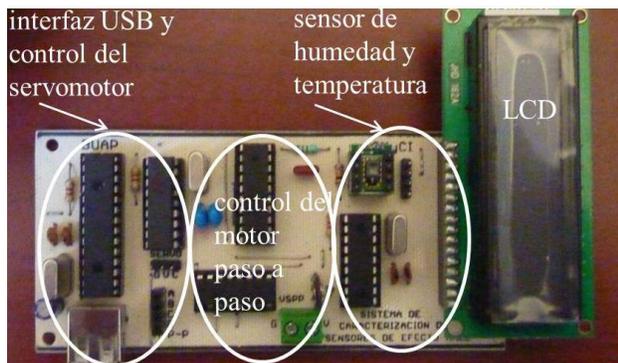


FIGURA 5. Tarjeta electrónica del sistema de control.

La comunicación de los microcontroladores con los otros bloques se realiza mediante el protocolo de comunicaciones en serie I2C. Este protocolo permite la conexión de otro sensor, que utiliza el mismo protocolo, sin necesidad de realizar modificaciones mayores a la tarjeta de control. Todo el bloque de control es alimentado mediante el puerto USB (Fig. 5), por la cual se agregó un conector para la alimentación independiente de los motores del sistema mecánico de movimientos en la superficie θ -Z. Con esto se evitan una demanda superior de corriente y la interferencia eléctrica de los motores. Además, se desarrolló una tarjeta de prueba (Fig. 6) para obtener las respuestas de las caracterizaciones eléctricas de los microsensores diseñados y comerciales.

2.2. Software para el sistema de caracterización eléctrica

El software desarrollado en este trabajo permite el control de la rotación como la translación del sistema mecánico de movimientos en la superficie θ -Z. Para implementar este software se utilizó la interfaz USB en su versión 2.0, la cual incluye las líneas de alimentación que proporcionan 5 volts con una corriente de 500 mA desde la PC [17]. Un dispositivo

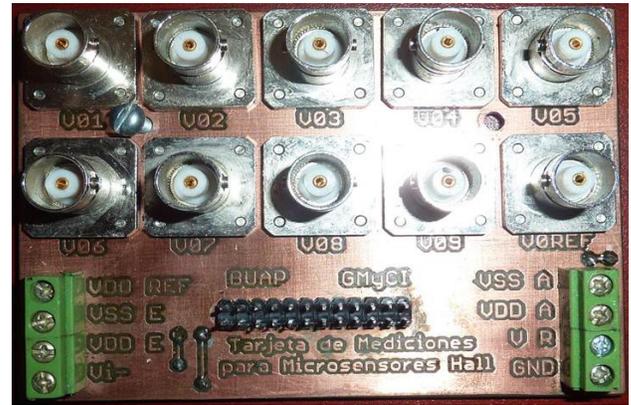


FIGURA 6. Tarjeta electrónica de prueba para los microsensores y sensores comerciales.

USB puede usar cualquiera de los cuatro tipos de transferencia que existen: control, interrupción, isócronas y masiva (Bulk) y una de las velocidades de transferencia de datos de acuerdo a la aplicación propuesta. El tipo de transferencia Bulk [18] es usada en este diseño porque permite enviar y recibir grandes cantidades de datos, lo cual es conveniente para la transmisión de datos entre el software y los módulos de detección. La interfaz USB puede realizar una configuración automática cuando un dispositivo USB es conectado y la PC detecta automáticamente el controlador apropiado. Esto sin necesidad de reiniciar o aplicar un software al sistema operativo.

La primera etapa de programación para el sistema de caracterización de microsensores de efecto Hall consiste en verificar que la interfaz USB se encuentre debidamente conectada. En la siguiente etapa de programación del sistema de caracterización, se accede a los buffers de entrada y salida del puerto USB. Posteriormente, se escribe en el buffer de salida para mandar la información correspondiente. Cuando se establece la comunicación entre un dispositivo y el puerto USB, las señales de control son enviadas al microcontrolador correspondiente, para activar el posicionamiento del servomotor o el motor paso a paso mediante la IGU.

Para ambos la rotación del módulo de detección en el eje θ y la traslación del módulo de excitación en el eje Z del sistema de caracterización de microsensores de efecto Hall, se utiliza la misma estructura de programación. Esta estructura consiste en los siguientes puntos: detección del dispositivo USB; establecimiento de un canal de comunicación entre el dispositivo, apertura de conductos de entrada y salida; escritura de 3 bytes de datos en el puerto USB para que sean leídos por el microcontrolador (Fig. 7). Cada uno de estos bytes determinará el accionamiento el servomotor para establecer el movimiento en el eje θ o la dirección de giro al motor paso a paso y la posición a lo largo del eje Z. Por último, se cierra el puerto terminando todas las tareas de envío y recepción de datos de un dispositivo conectado al puerto USB.

Para el registro de los datos provenientes de los microsensores de efecto Hall y de los sensores comerciales se utilizó el nanovoltímetro 2182 A de Keithley[®], el cual cuenta con dos

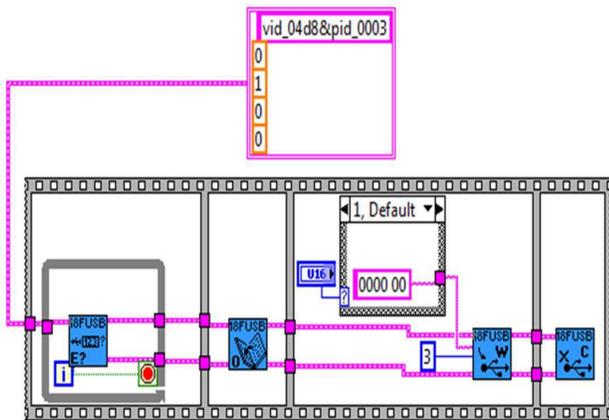


FIGURA 7. Diagrama a bloques para establecer las conexiones en el microcontrolador.

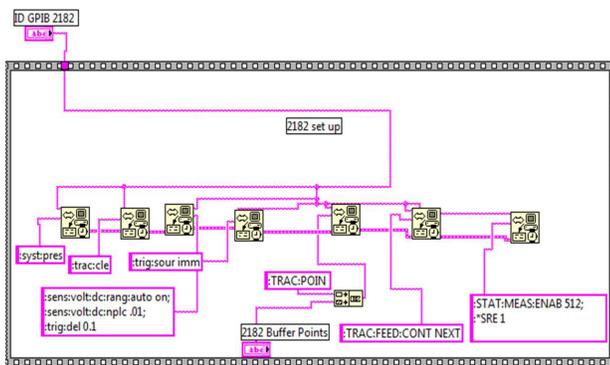


FIGURA 8. Diagrama a bloques para la inicialización del nanovoltímetro.

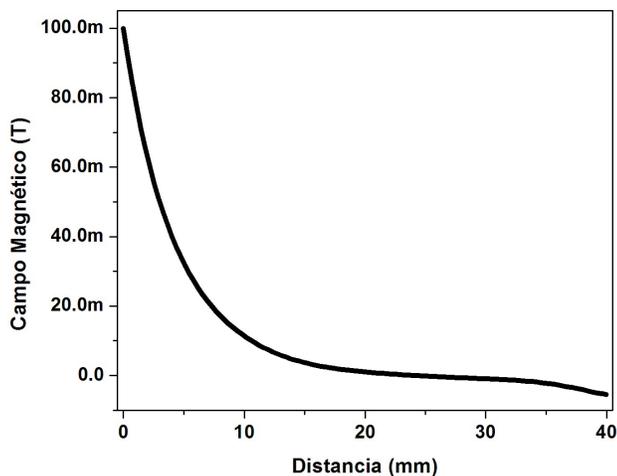


FIGURA 9. Curva de intensidad de campo magnético contra distancia.

canales: el canal 1 presenta 5 rangos de medición 10 mV, 100 mV, 1 V, 10 V y 100 V con una resolución de 1 parte por millón (ppm) para todos los casos, el canal 2 presenta 3 rangos de medición 100 mV, 1 V, y 10 V, con una resolución de 1 ppm. La inicialización del instrumento consiste en él

envió de las instrucciones determinadas (Fig. 8) por el fabricante para la selección del modo de medición y los rangos de protección establecidos para el funcionamiento correcto del equipo.

Para la inducción del campo magnético se empleó un magneto de Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB), el cual tiene un diámetro de 28.57 milímetros. Este magneto genera un campo magnético muy intenso a pequeñas distancias (Fig. 9). Para obtener la curva característica se empleó el sistema de medición de campo magnético CI-6520A de Pasco®.

3. Microsensores de Efecto Hall

El efecto Hall en semiconductores y su coeficiente Hall dependen de la concentración de portadores (electrones y huecos) y de sus movilidades, debido a la acción de la fuerza de Lorentz que puede ser derivada de la ecuación de transporte de Boltzmann [19-20]. Si en una placa de material semiconductor tipo n con contactos óhmicos, el gradiente de la concentración de portadores se desprecia, la densidad de corriente de electrones está dada por (1) [21].

$$J_n(B) = \sigma_{nB} [E + \mu_n^*(B \times E) + \mu_n^{*2}(B \cdot E) B] \quad (1)$$

donde $\sigma_{nB} = \sigma_n [1 + (\mu_n^* B)^2]^{-1}$, siendo σ_n la conductividad a $B = 0$, E el campo eléctrico, μ_n^* es la movilidad Hall de electrones. La movilidad Hall es proporcional a la movilidad de arrastre μ_n siguiendo la relación $\mu_n^* = r_n \mu_n$, en donde r_n es el factor de dispersión que para el silicio tipo n con baja concentración de donadores tiene un valor de 1.15 a temperatura ambiente.

Considerando un semiconductor isotrópico, la expresión (1) puede tener dos casos: el primero donde el campo magnético B es paralelo al campo eléctrico E y el segundo donde el campo B es perpendicular al campo E . Este último caso describe el efecto transversal, es decir el caso cuando la densidad de corriente solo tiene componentes en la dirección x . Esta condición dada por $E_y = -\mu_n^* B E_x = R_H J_{nx} B$ o campo Hall que involucra el coeficiente Hall R_H . Este coeficiente en un semiconductor considera el proceso de transporte tanto de electrones y huecos (2).

$$R_H = \frac{r_n \left(\frac{\mu_n}{\mu_p}\right)^2 n - r_p p}{q \left[\left(\frac{\mu_n}{\mu_p}\right) n + p\right]^2} \quad (2)$$

donde q es la carga del electrón, n y p son las concentraciones de electrones y huecos, respectivamente. Esta condición se alcanza con una geometría de longitud grande comparada con el espesor del sensor (Fig. 10).

El sensor de efecto Hall se basa en la interacción entre los portadores de carga y el campo magnético aplicado. Cuando un electrón se mueve a través de un campo magnético, una fuerza actúa sobre él. De esta forma el campo magnético y la corriente eléctrica producen un voltaje Hall transversal V_H , el cual es obtenido por (3).

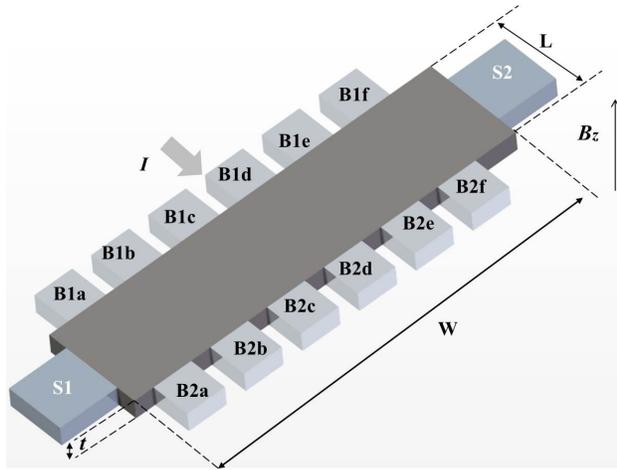


FIGURA 10. Sensor de efecto Hall rectangular. S1 y S2 son los contactos de sensado, t es el espesor del sensor, B_z es la componente perpendicular del campo magnético aplicado, I es la corriente de control aplicada a través de los contactos B1a-f, B2a-f, L es el largo y W el ancho del sensor.

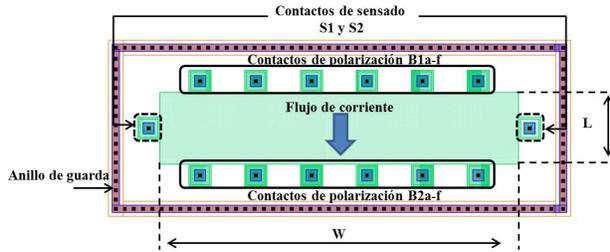


FIGURA 11. Sensor de efecto Hall con 6 contactos de polarización.

$$|V_H| = \left| \frac{R_H}{t} I B_z \right| G_{err} \quad (3)$$

donde t es el espesor del sensor, I es la corriente de control, B_z es la componente perpendicular del campo magnético aplicado, G_{err} es el factor geométrico de error. De acuerdo a la teoría para sensores rectangulares [22], la geometría de la placa conductora predice un factor geométrico de corrección $G_{err} = 1$, para que no exista pérdida en los portadores recolectados por los contactos S1 y S2. De esta forma, se puede obtener el máximo voltaje Hall disponible de los sensores.

Se diseñaron y fabricaron 9 microsensors usando el proceso comercial estándar CMOS de 0.6 micras, los microsensors están hechos con una placa de semiconductor tipo n con dimensiones de $25 \times 10 \times 2.5 \mu\text{m}$ a una concentración de $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Los primeros 7 sensores tienen un diseño similar con la única diferencia en sus relaciones W/L (ancho y largo, respectivamente) de la placa de semiconductor (Fig. 11) y el número de contactos de sensado con los que cuenta cada uno. Los dos sensores restantes se encuentran conectados en una configuración de puente de Wheatstone. La diferencia entre los sensores es el número de contactos de polarización. Adicionalmente, los microsensors de efecto Hall tienen un anillo de guarda para evitar fugas de corriente. Con este tipo

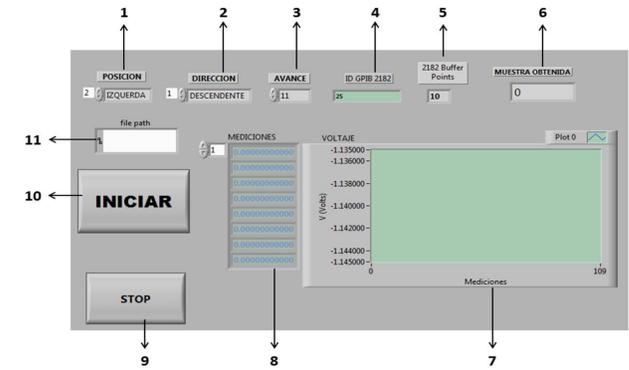


FIGURA 12. Panel frontal del movimientos en la superficie θ -Z.

de arreglo se espera obtener un rango de detección de -5 mT a 100 mT .

4. Resultados

Con el fin de establecer una mejor evaluación de los parámetros eléctricos de los diferentes sensores, se establecieron los siguientes criterios de caracterización: el magneto de NdFeB fue usado como la fuente de excitación para todos los sensores con un rango de densidad de campo magnético de -1.2 mT a 120 mT ; la temperatura ambiente fue de 20.2°C con una humedad relativa de 62% ; la distancia de la fuente de excitación está comprendida entre 0 y 4 cm ; y la distancia total está dividida en 110 pasos.

Para obtener una curva de respuesta de los sensores respecto al campo magnético aplicado (Fig. 9), se obtuvo (mediante un análisis paramétrico) una ecuación que relaciona el campo magnético respecto a la distancia (4) [23].

$$f(x) = -0.93 \exp(0.07x) + 1000 \exp(-0.22x) \quad (4)$$

donde $f(x)$ es el campo magnético aplicado y x es la distancia. Con la Ec. (4) se obtienen las gráficas de voltaje Hall con respecto al campo magnético aplicado.

Se caracterizaron dos sensores comerciales, el SS49E y el SS59E de Honeywell, cuyo rango de detección se encuentra entre -100 mT a 100 mT . Y dos sensores fabricados bajo el proceso comercial CMOS de 0.6 micras. Con el panel frontal (Fig. 12), se controla el sistema de caracterización para los microsensors de efecto Hall. El icono 1 es el selector de posición que establece el desplazamiento en la dirección del eje θ ; el icono 2 permite el movimiento en la dirección del eje Z en forma ascendente o descendente; el icono 3 indica la opción de escoger el número de pasos deseado para el avance por cada medición que se realiza; el icono 4 asigna una dirección al bus de interfaz de propósito general (GPIB) al nanovoltímetro. Estas son realizadas en una misma medición, las cuales almacena y efectúa un método de integración para obtener un valor promedio de la señal. El ícono 6 permite la observación de la muestra obtenida durante la medición en curso. El icono 7 establece la representación gráfica de todas las mediciones obtenidas. El icono 8 muestra valor numérico

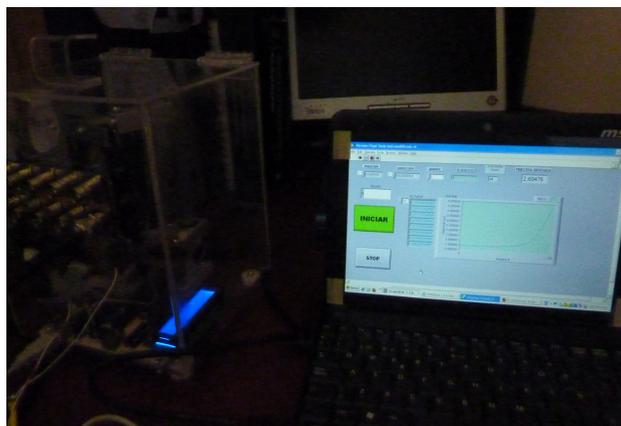


FIGURA 13. Sistema de caracterización para microsensores de efecto Hall.

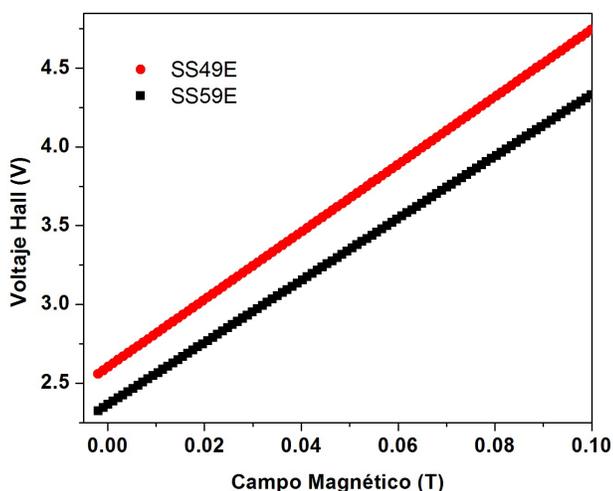


FIGURA 14. Respuesta al campo magnético de los sensores de efecto Hall comerciales.

de cada una de las mediciones obtenida. En cambio, el icono 9 (botón de emergencia) detiene todo el proceso de manera automática. Con el icono 10, una vez que se establecieron las posiciones en la superficie θ -Z, se inicia el proceso de caracterización eléctrica. Finalmente, el icono 11 guarda las mediciones realizadas en un archivo de texto para su posterior análisis.

Todas las curvas obtenidas de los sensores de efecto Hall se realizaron con el instrumento virtual diseñado en este trabajo (Fig. 13). Para el panel frontal del instrumento virtual, se agregó la opción de modificar el avance del motor cuando no se requiera utilizar las 110 mediciones posibles; así, como la opción de repetir la medición si los datos obtenidos están fuera del rango esperado.

Los resultados para los sensores de efecto Hall (Fig. 14) presentan el mismo comportamiento lineal debido a que los sensores SS49E y SS59E tienen la misma topología de construcción. La única diferencia entre ellos es el tipo de encapsulado. La respuesta obtenida de estos sensores con nuestro sistema de caracterización tiene el mismo comportamiento

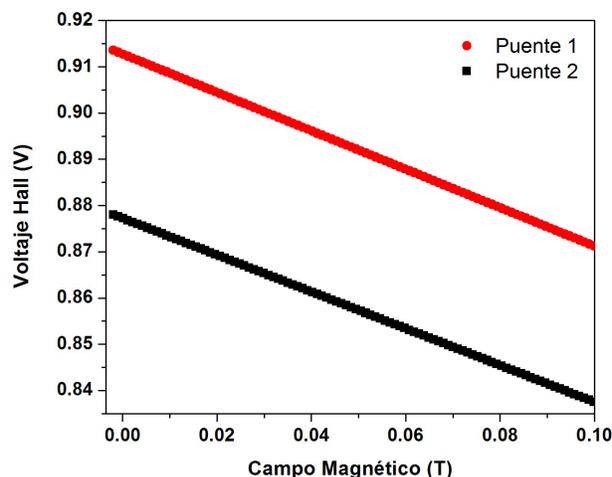


FIGURA 15. Respuesta al campo magnético de los microsensores de efecto Hall rectangulares.

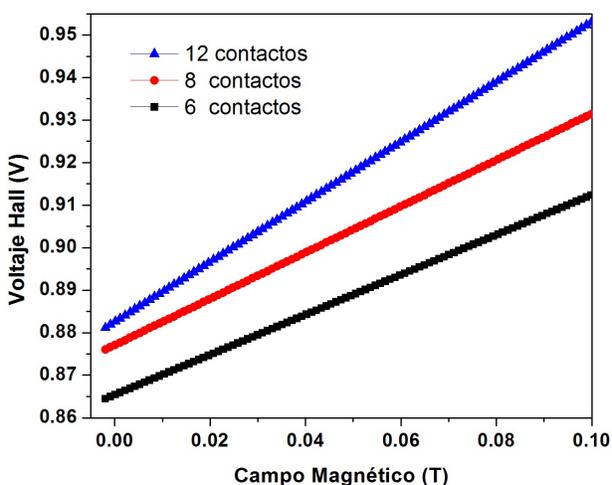


FIGURA 16. Respuesta al campo magnético de los microsensores de efecto Hall en configuración de puente de Wheatstone.

establecido en la hoja de especificaciones dados por el fabricante. Los sensores fueron polarizados con un voltaje de 5 volts a través del puerto USB.

Con el proceso comercial CMOS de 0.6 micras, se fabricaron 9 microsensores de efecto Hall con distintas características. Para evaluar la dependencia del factor geométrico de corrección, los microsensores presentan diferentes relaciones L/W , largo y ancho, respectivamente. Los microsensores se alimentan con un espejo de corriente el cual fue fabricado bajo el proceso CMOS de 0.6 micras, este puede ser ajustado en un rango de $100 \mu A$ hasta $10 mA$. Los microsensores se encuentran en un encapsulado CSB02477 de 24 pines, el voltaje de polarización para los microsensores fue de $\pm 2.5 V$ a una corriente de $100 \mu A$. De acuerdo a las curvas obtenidas para los distintos sensores, se observa que los microsensores rectangulares (Fig. 15) presentan un rango dinámico de $100 mV$. Las diferencias entre estos microsensores son sus factores geométricos de corrección. El microsensor de 12 contactos de sensado tiene un factor geométrico de

corrección de 0.99, con lo que se obtienen una mayor linealidad en comparación del microsensor de 6 contactos de sensor, el cual tiene un factor geométrico de corrección de 0.89. Los microsensores fabricados en configuración de puente de Wheatstone (Fig. 16) presentan una respuesta lineal en un rango dinámico de 50 mV. Los microsensores en esta configuración presentan un voltaje Hall de salida positivo debido a que el circuito de lectura está conectado en configuración no inversora.

5. Conclusiones

En este trabajo se diseñó e integró un sistema de caracterización eléctrica para microsensores de efecto Hall. Este sistema presenta varias características importantes, como robustez, rigidez, y capacidad de reconfiguración que puede ayudar en un futuro a la caracterización de otros tipos de sensores. Para el control del sistema de caracterización de microsensores de efecto Hall, se implementó una interfaz USB debido a que es el puerto de comunicación más usado en la actualidad. Así, el sistema propuesto puede ser implementado en cualquier PC.

El instrumento virtual desarrollado tiene una interfaz gráfica de usuario de fácil acceso y ambiente amigable con el usuario final, con la cual se controla el sistema mecánico de movimientos en la superficie θ -Z, los módulos de excitación y el registro de las señales obtenidas de los microsensores de efecto Hall. Este sistema fue implementado con éxito, ya que se comprobó su correcto funcionamiento a través de las caracterizaciones eléctricas de los sensores comerciales SS49E, SS59E y los microsensores de efecto Hall fabricados bajo el proceso CMOS comercial de 0.6 μm .

Como trabajo futuro se plantea la caracterización de sensores ópticos, óptico-reflectivos, sensores de distancia por ultrasonido, entre otros, con el fin de comprobar la versatilidad del sistema de caracterización desarrollado.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo económico a través del Programa de Fortalecimiento al Posgrado Nacional de CONACYT.

1. C. Quijano, K. Peraza, and O. Quiñones, in *Proceedings of the International Congress on Instrumentation and Applied Sciences* (Universidad Nacional Autónoma de México, 2010) RQI69.
2. R. Uribe, R. Gómez, G. Herrera, A. Muñoz, in *Proceedings of the International Congress on Instrumentation and Applied Sciences* (Universidad Nacional Autónoma de México 2010) RUI294.
3. C. Castro, G. Mata, in *Proceedings of the International Congress on Instrumentation and Applied Sciences*, 2010, (Universidad Nacional Autónoma de México) GMI770.
4. S. Domínguez, R. Juárez, P. García, and A. Herrera, *IEEE Sensors J.* **12** (2012) 935.
5. J. Robles, *Memoria de actividades*. (Escuela Politécnica superior de Algeciras, Cádiz, 2002).
6. R. Borjas, N. Quispe, *Rev. Fac. Ing.* **6** (1999) 45.
7. I. Lemus, J. Bargas, F. Tecuapetla, E. Galárraga, and L. Carrillo, *Rev. Mex. Ing. Bioméd.* **6** (2006) 82.
8. A. Sarría, *El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas* (2006) 567.
9. T. Montañez, C. González, M. García, M. Escalente, *Conferencia conjunta iberoamericana sobre tecnologías para el aprendizaje* (2009).
10. Manual de usuario LabVIEW[®], (2003): <http://www.data-sheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/1330.pdf> Acceso Noviembre (2011).
11. J. Axelson, *USB complete everything you need to develop custom USB peripherals*. (United States of America: Lakeview Research LLC, 2005).
12. C. Aguilar, *Control Implícito para una cadena cinemática cerrada de dos grados de libertad*. (Tesis de Doctorado, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, DF, 1999).
13. Fabricante de Circuitos Integrados. On Semiconductor: <http://www.onsemi.com> Acceso Abril (2011).
14. Fabricante de microcontroladores y memorias: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/35007b.pdf>. Acceso Marzo (2012).
15. Controlador de motor paso a paso: http://www.st.com/internet/com/technical_resources/technical_literature/datasheet/CD00000063.pdf. Acceso Abril (2012).
16. Fabricante de sensores: <http://www.sensirion.com/en/home/> Acceso Abril (2012).
17. D. Rómulo, *Diseño y construcción de un sistema de iluminación para el laboratorio de instrumentación y control por el puerto USB*. (Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2006).
18. A. Bernal, *Desarrollo de un software de medición del estrés para un dispositivo foto-pletismógrafo basado en el protocolo USB 2.0*. (Tesis de Maestría, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, DF, 2010).
19. S. Sze, K. Ng, *Physics of semiconductor devices*. (New Jersey: John Wiley & Sons, 2004).
20. R. Popovic, *Hall effect devices*. (Bristol, IOP, 2004).
21. H. P. Baltes, R. Popovic, *Proc. IEEE.* **74** (1986) 1107.
22. J. B. Kammerer, L. Hébrard, V. Frick, P. Poure, F. Braun, *IEEE Sensors J.* **3** (2003) 700.
23. G. Rojas, *Diseño y Construcción de un Sistema de Caracterización de Circuitos Integrados de Aplicación Específica y Microsensores*. (Tesis de Licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, 2011).