

DISEÑO DE UN DISPOSITIVO MEDIDOR DE CAMPO MAGNÉTICO

Kaspierowicz Iván¹, Petrini Aaron²

Instrumentos y mediciones electrónicas, Ingeniería de sonido
Universidad Nacional de Tres de Febrero, Buenos Aires, Argentina.

¹ kaspierowicz@gmail.com ² aaron.petrini96@gmail.com,

Segundo cuatrimestre del 2021

Resumen

Este informe describe el trabajo realizado por estudiantes de la Universidad Nacional de Tres de Febrero para la materia Instrumentos y Mediciones Electrónicas. Se propone diseñar un medidor de campo magnético que cubra un rango de medición de de 2 G a 1999.9 G, mediante la utilización de diferentes puntas de medición. Se desea extenderse tanto en el aspecto teórico del funcionamiento del dispositivo, y el procedimiento de desarrollo del circuito y construcción del mismo.

Keywords:Sensor Hall, campo magnético, voltímetro

1. INTRODUCCIÓN

Los campos electromagnéticos son un fenómeno presente en la naturaleza, a veces obtenido de forma natural y otras provocado por intervención del hombre. Cuando una carga eléctrica circula en un conductor se crea un campo electromagnético alrededor, cuya oscilación genera una onda que radia energía desde dicho conductor, utilizando el campo electromagnético como medio para transportar dicha energía. Una onda electromagnética es un campo eléctrico y otro magnético acoplados, a corta distancia del emisor ambos son independientes y en campo lejano están acoplados. Los campos electromagnéticos poseen energía, y dependiendo de el nivel de esta se pueden distinguir dos tipos de radiación del campo: ionizante y no ionizante. Las radiaciones ionizantes se caracterizan por poder ionizar la materia, es decir, arrancar electrones de un átomo o molécula, pudiendo así, producir cambios en la composición en la materia y, por lo tanto, pudiendo producir daños a la salud humana. En el caso de los no ionizantes, la energía no es la suficiente como para ionizar la materia. La exposición a fuentes con este tipo de radiación a crecido a lo largo de todo el siglo XX y XXI, en paralelo a los avances en las tecnologías inalámbricas, especialmente en el sectores como el de la comunicación. Las personas están expuestos a estos campos tanto en el ámbito domestico como en el laboral, en un amplio espectro de frecuencias. Es importante destacar que, la población es especialmente aprensiva frente a la exposición de campos electromagnéticos, incluso aquellos de bajo nivel, por lo que es importante mejorar en el conocimiento de los niveles reales de exposición así como en sus posibles efectos sobre la salud, para un correcto tratamiento público de este tema. Debido a estas razones, cada país tiene regulaciones correspondiente a las mediciones de campos magnéticos y campos eléctricos. En el caso de la Argentina se debe hacer uso de la resolución ENRE 1724/1998 [1] para esto. Se desarrolla entonces en este trabajo, el circuito correspondiente a un medidor de campo magnético que permita realizar mediciones dentro de 3 distintos rangos de medición, mediante la implementación de diferentes puntas de medición, con diferentes sensores de diferente sensibilidad cada uno. El rango frecuencial elegido es el de interés para aplicaciones de audio de hasta 20 kHz. Se dividirá el presente trabajo en 3 partes, en la primera se proveerán diferentes conceptos teóricos para ayudar a la comprensión del circuito elaborado, en la segunda se lleva a cabo la explicación del proceso y desarrollo del circuito del medidor y por ultimo una sección de resultados en la que se mostrara el diseño final del medidor con su PCB correspondiente y lista de componentes para poder realizar su construcción.

2. MARCO TEÓRICO

En la presente sección se explican la teoría básica necesaria para el entendimiento del diseño propuesto.

2.1. Sensor de efecto Hall

El efecto Hall [2] se aprecia cuando por una lámina conductora o semiconductora se hace circular una corriente y se coloca en presencia de un campo magnético. Las cargas que están circulando experimentan una fuerza magnética y son desplazadas hacia uno de los bordes de la lamina. Esto hace que aparezca un exceso de carga negativa en uno de los bordes en tanto que en el otro aparece un exceso de carga positiva, lo que provoca que aparezca un campo eléctrico que a su vez ejerce una fuerza de carácter eléctrico sobre las cargas. Esta fuerza eléctrica, actúa en la misma dirección pero en sentido contrario a la magnética. La acumulación de cargas continua hasta que el campo eléctrico se hace suficientemente grande como para que la fuerza eléctrica compense a la magnética. Esta situación se caracteriza por la diferencia de potencial que aparece entre los bordes denominada voltaje Hall (V_H).

$$V_H = GR_H IB \cos(\theta)$$

Donde B es el campo magnético, θ es el ángulo entre la dirección del campo y la normal al sensor de efecto Hall, R_H es el coeficiente de Hall que caracteriza al material usado en el sensor de efecto Hall, G es un factor geométrico que depende del tamaño y forma del generador en si, e I es la corriente.

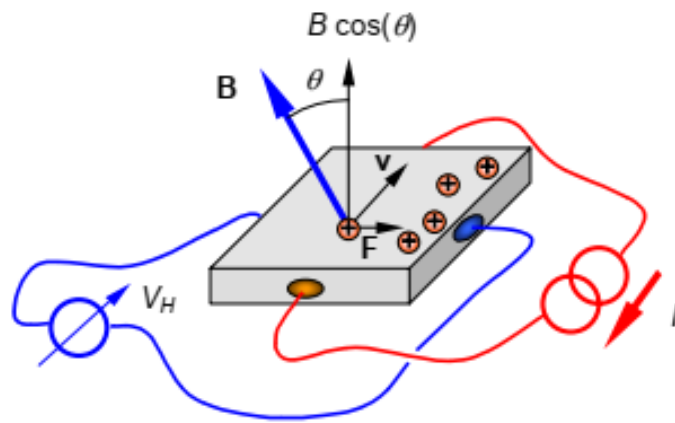


Figura 1: Representación esquemática de la fuerza actuante en los portadores mayoritarios (en este caso los huecos) en un sensor de efecto Hall ideal y la aparición del voltaje Hall.

2.2. Mediciones de campo magnético con sensores de efecto Hall

Un sensor de efecto Hall [3] es un dispositivo de 4 terminales. El control de corriente generalmente esta garantizado por una fuente de AC o DC altamente estable, mientras que el V_H se lee por un voltímetro de alta impedancia o alimentará a los componentes electrónicos de adquisición (amplificación o condicionamiento). En la practica, dicha fuente no debe ver como carga a los componentes electrónicos que se encarguen de la lectura del V_H , para así prevenir pérdidas de corriente. Esto generalmente se logra usando un amplificador de entrada diferencial:

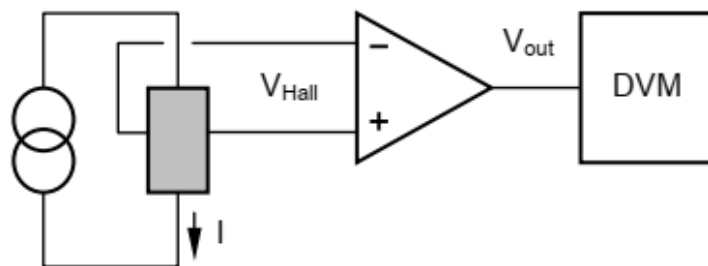


Figura 2: Principio de funcionamiento de un sensor de efecto Hall mostrando la fuente de corriente.

El V_H medido debe ser convertido a un valor de campo usando una factor de calibración, para lograr una precisión del del orden del 1 % o mejor, dicha factor debe ser establecido mediante una medición independiente en un campo magnético conocido. La relación entre el campo magnético y el V_H es de hecho uno de los mayores inconvenientes de los sensor de efecto Hall. El sensor de efecto Hall es un dispositivo direccional, sensible a la componente normal del campo en relación al generador. Un ángulo entre el campo y la normal de la superficie del generador resulta en una reducción aparente de la fuerza del campo, esto puede ser corregido empíricamente al inclinar el generador hasta obtener la máxima lectura posible. Por ultimo, es importante minimizar o compensar efectos parásitos tales como la aparición de un offset o desfase de tensión, esta compensación puede ser electrónica o digital. En cualquier caso, la estabilización de la temperatura es necesaria para prevenir un cambio en el desfase causado por cambios de temperatura o gradientes de temperatura.

2.3. Rango y exactitud

Gracias a los avances en tecnología y el avance en la manufacturación y diseño de los circuitos integrados, los sensor de efecto Hall se convirtieron en dispositivos económicos utilizados para aplicaciones de gran escala y mapeo de campo. La direccionalidad y la pequeña área activa de estos sensores lo vuelven el instrumento ideal para mapear campos magnéticos en un rango muy variado de fuerza y forma. Otra de las cosas atractivas de estos dispositivos es el amplio rango dinámico y la posibilidad de operaciones estáticas bajo una excitación de corriente constante. El rango del campo que puede ser prácticamente medido, esta relacionado con la capacidad de medición del votaje y la sensibilidad del sensor. La sensibilidad varia con el material, el grosor del sensor y el tamaño del área activa. Los sensores Hall disponibles comercialmente tienen una sensibilidad promedio de entre 10 mV/T a 1 V/T. El rango típico para estos sensores es de por encima de 1 mT. Mediciones de voltaje precisas son posibles debajo del nivel de los uV usando voltímetros especializados, dándonos entonces una resolución del campo mejor que la de los 0.1 uT.

La exactitud de las mediciones esta mayormente definida por las alinealidades y su relación con la temperatura, errores de alineamiento, y efectos parásitos. Los equipos comerciales tienen una exactitud típica de 1000 ppm de lectura. Mediante calibración especifica, controles de temperatura y varias técnicas de compensación se puede llegar a mejorar ese numero por un factor de 10, dando una exactitud absoluta de 100 ppm de lectura.

2.4. Alinealidades y efectos parásitos

Los sensores de efecto Hall son fabricados usando la misma tecnología aplicada para la producción de semiconductores finos, usualmente directamente en en forma de circuitos integrados. Debido a su pequeño tamaño el flujo de la corriente dentro del material es mucho mas complejo que el ejemplificado en la figura previa. La conexión en los terminales del integrado actúan como discontinuidades que perturban el flujo de la corriente o afectan la captación de voltaje. Cuando el tamaño de las conexiones es grande con respecto a la dimensión del propio sensor de efecto Hall, las conexiones pueden desviar parcialmente la corriente y así deformar el patrón de campo eléctrico ideal. La geometría finita de los contactos y la derivación del voltaje Hall influyen en el patrón del campo eléctrico en diferentes formas, aplicando un campo magnético diferente. Como resultado, el sensor tiene una respuesta no lineal al campo, generalmente identificada como una dependencia de campo hacia el factor geométrico (G). Además de esta alinealidad geométrica, estos sensores también tienen una no linealidad material que es comúnmente atribuida al coeficiente Hall (R_H). Mediante la elección adecuada de la geometría y el material, es posible compensar parcialmente los dos efectos, logrando una respuesta lineal mejor que el 1 % sobre un amplio rango del campo. Otra fuente de no linealidad en las características de los sensores de efecto Hall es la variación de la temperatura. Tanto la movilidad de la carga como la conductividad del material dependen de la temperatura, por lo que el coeficiente R_H tiene una dependencia de la temperatura que puede ser del orden de los 100 a los 1000 ppm / ° C. La corriente de control está asociada con una pequeña fuente de calor que debe controlarse para lograr una alta precisión. Como se discutió anteriormente, la lectura de voltaje en un sensor Hall depende de la dirección del campo magnético. El V_H máximo se mide cuando el campo magnético está en una dirección normal a la del sensor, e idealmente es cero cuando el campo magnético está en el plano del dispositivo. En realidad, cualquier anisotropía en el sensor conduce a un voltaje distinto de cero también cuando el campo está en el plano del sensor. Este efecto a menudo se denomina **planar Hall effect** y depende de la intensidad del campo y del ángulo entre el campo y la dirección de la corriente eléctrica en el sensor dando lugar a una tensión adicional en los terminales:

$$V_{planar} = V_{HP} B^2 \cos(2\phi)$$

Donde V_{HP} es el coeficiente típico de el material utilizado y de la geometría del sensor. Se muestra en la siguiente figura el típico **planar Hall effect** en un sensor.

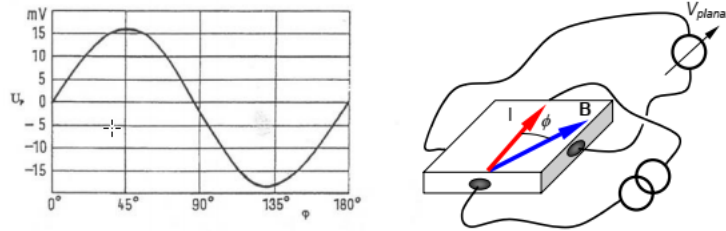


Figura 3: Medición del voltaje del planar Hall effect con un campo de 1T, representado en un gráfico de la función del ángulo entre el campo y la dirección de la corriente en el sensor.

Los gradientes de campo magnético también pueden tener un efecto en el V_H , principalmente porque el sensor tiene un tamaño finito. Sin embargo, el efecto de la variación de campo en la región sensible de un sensor de efecto Hall es pequeño y generalmente se ignora.

Un efecto parásito adicional es el asociado con la presencia de un desvío de voltaje incluso en condiciones de campo magnético aplicado nulo. El desplazamiento puede ser de origen geométrico (desalineación de los terminales de tensión con respecto a las líneas equipotenciales eléctricas), asociado con efectos rectificadores en la conexión metal-semiconductor, tensión inducida o originada por gradientes en las propiedades del material (p. ej. densidad de dopaje). El voltaje de compensación depende de la temperatura y, además, los gradientes de temperatura en las conexiones pueden generar tensiones termoeléctricas. Las compensaciones de voltaje pueden ser significativas, 0,1 a 1 mV son valores típicos y, por lo tanto, deben controlarse o compensarse para lograr una buena precisión.

3. PROCEDIMIENTO

3.1. Circuito general

El siguiente diagrama en bloques de la figura 4 representa el circuito utilizado para el medidor de campo magnético.

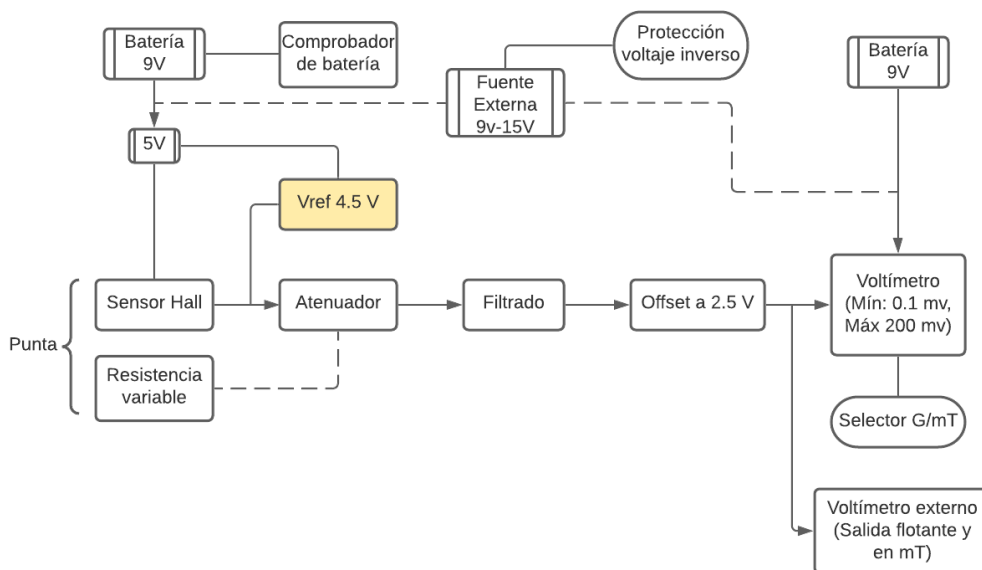


Figura 4: Diagrama en bloques del circuito propuesto.

En primer lugar, se tiene una punta la cual contiene al sensor Hall [4] junto a su potenciómetro correspondiente. A través de la resistencia variable se calibra el fondo de escala del mili-voltímetro con una tensión de referencia de 4.5 V (cuadro amarillo). Una vez realizada la calibración, la salida del sensor Hall (que trabaja entre 0.5 V y 4.5 V) se atenúa para no superar el máximo de 200 mV del voltímetro, esto se hace a través de un divisor resistivo con el potenciómetro de la punta y una resistencia fija. Luego, se realiza un filtrado propuesto por el fabricante del mili-voltímetro y se eleva a una tensión de offset de 2.5 V que corresponde al "Quiescent voltage output" del sensor hall, o en otras palabras, la tensión de salida que produce al no haber campo magnético inducido.

Por último, con el dispositivo LASCAR DPM-3AS-BL [5] se adquiere una lectura a la cual se puede modificar el punto decimal para una mayor precisión según el rango de trabajo. El mínimo valor posible de lectura es de 0.1 G, dado por el voltímetro, y el máximo depende de la sensibilidad del sensor utilizado. Se puede optar por utilizar un voltímetro externo el cual puede aportar una mayor resolución, en este caso la lectura se realizará en unidades de mT.

La tensión de alimentación debe ser lo mas constante posible debido al sensor, es por esto que se utiliza una batería de 9V y luego con un regulador [6] se baja a 5V. Para controlar el estado de las baterías se dispone un tact switch que si al presionarlo enciende el led, el nivel de batería está por debajo de 7V y esta necesita ser reemplazada. El voltímetro utiliza una batería independiente. Además, se puede optar por utilizar una fuente externa de entre 9V y 15V, dicha entrada posee una protección contra inversión de polaridad.

3.2. Puntas y calibración

Las puntas utilizadas tendrán dos rangos de medición, los cuales van desde ± 199.9 G y ± 1999.9 G. Se utilizan los sensores Hall A1308 de la marca Allegro microsystem en sus presentaciones de sensibilidad: 5 mV/G y 0.5 mV/G respectivamente.

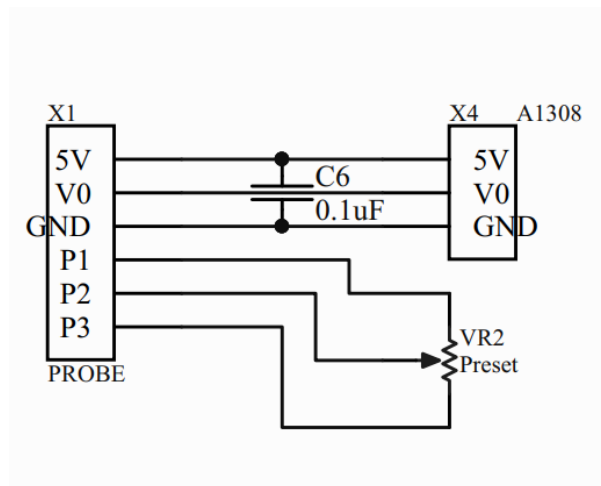


Figura 5: Puntas de medición.

Se utiliza un conector Amphenol de 6 pines (X1 en la figura 5) el cual brinda un conexionado rápido e intuitivo para los usuarios y la posibilidad de integrar el potenciómetro de calibración dentro de la propia punta.

La calibración de fondo de escala se realiza con la tensión de referencia de 4.5 V y se ajusta el preset multivoltas hasta que se vea en el display el valor de referencia en Gauss. Dicho valor de referencia se calcula sobre el rango de trabajo del sensor: el máximo valor de tensión de salida del sensor es de 4.5 V y el mínimo es de 0.5 V, por lo tanto se posee un rango de $\pm 2V$, entonces el fondo de escala resulta en $2V/k$ con k la sensibilidad en [mV/G].

Modelo	Sensibilidad	Rango	Preset [k Ω]
A1308KUATN-5-T	5 mV/G	\pm 199.9 G	50 k Ω
A1308LLHLX-05-T	0.5 mV/G	\pm 1999.9 G	100 k Ω

Tabla 1: Puntas de medición

El valor mínimo que pueden medir los sensores utilizados depende exclusivamente del piso de ruido del dispositivo. Los fabricantes disponen un ruido a la salida equivalentes a 1.7 G para el sensor de sensibilidad igual a 5 mV/G, y de 2.86 G para el sensor de menor sensibilidad. El parámetro "Quiescent voltage output" es igual para los 3 modelos utilizados. Todos los sensores poseen una frecuencia máxima de medición de 20 kHz.

El capacitor de 100 nF entre la tensión de alimentación y 0V se utiliza para proveer una tensión estable al sensor, como ya se mencionó anteriormente.

3.3. Medición

Se puede visualizar la sección de medición del circuito completo en la figura 6.

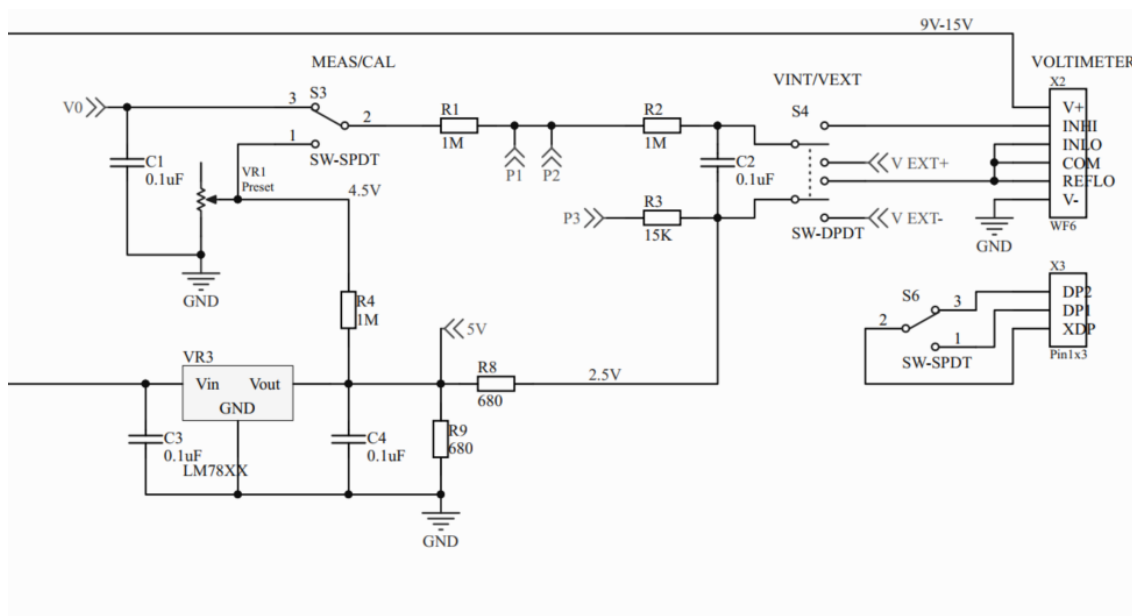


Figura 6: Circuito utilizado (sección: Medición).

El selector S3 permite alternar entre los modos de medición y calibración. La tensión de referencia se ajusta con el preset VR1 de 20 k Ω el cual se encuentra dentro del medidor. Esta tensión se obtiene a partir de la tensión salida del regulador LM7805 (VR3 en la figura). También se extrae la tensión de offset de 2.5 V a través del divisor resistivo entre R9 y R8.

El filtrado requerido por el fabricante del voltímetro se realiza a través de R1 y C2, mientras que R2; R3 y la resistencia variable de la punta (referenciada en la figura como P1,P2 y P3) se encargan de atenuar la salida del sensor. El selector S4 permite elegir al usuario entre el voltímetro interno, o utilizar las salidas del dispositivo para emplear un voltímetro externo. Cabe destacar que los resultados obtenidos con un voltímetro externo se visualizarán en unidades de [mT], y ya que la medición es exclusivamente flotante, el usuario no debe referenciar su medición a 0V.

El conexionado del voltímetro será abordado más adelante.

3.4. Fuente de alimentación

Para alimentar correctamente los dispositivos se utiliza el siguiente circuito de la figura 7.

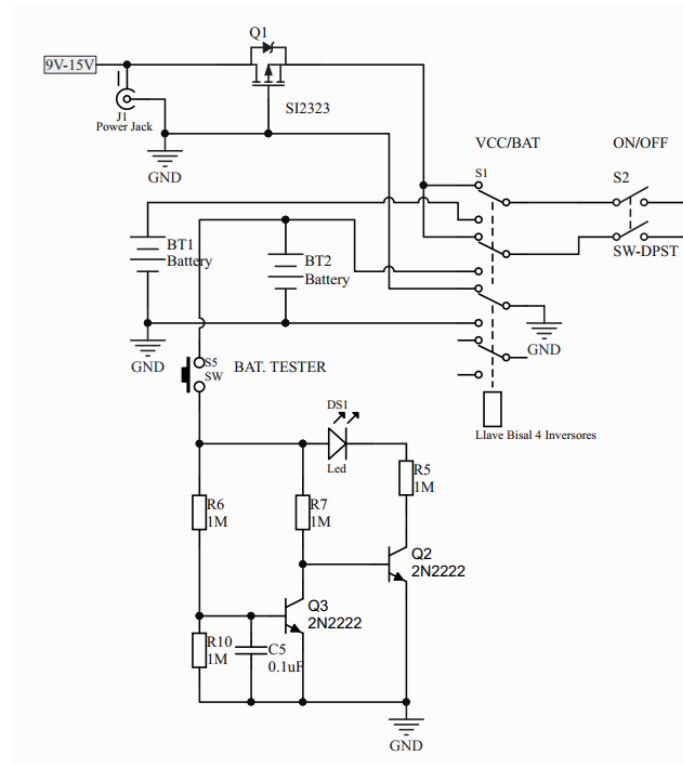


Figura 7: Circuito utilizado (sección: Fuente de alimentación).

En primer lugar, el selector S1 permite alternar entre las baterías de 9V internas del dispositivo o la utilización de una fuente de alimentación externa. *Aclaración: Para una mejor visualización del esquemático y ante la imposibilidad de diseñar un layout de una llave 3PDT, se decide utilizar la llave bisal de 4 inversores, sin embargo, en la PCB se colocarán pines de 2*5 para el conexionado de una llave 3PDT.*

El botón táctil activa el circuito que comprueba el estado de la batería principal, se decide realizarlo de esta manera y no de forma fija para evitar un consumo innecesario de corriente. Este circuito enciende un LED naranja si el nivel de la batería se encuentra por debajo de los 7V, de esta forma el usuario puede saber cuando reemplazar la batería del dispositivo. El funcionamiento del circuito se basa en que R6 y R5 forman un divisor de tensión, de forma tal que la salida este por debajo de los 0.6V cuando la batería necesita un reemplazo. Este voltaje se utiliza para la carga de C5, y alimenta la base del transistor Q3. Cuando en la base de dicho transistor se tiene un voltaje mayor a 0.6V, este conduce y provoca el apagado del led que esta conectado a Q2, dado que este ultimo no conducirá por estar en estado de corte, dejando el led en una rama abierta.

La entrada de fuente externa posee una protección contra polaridad invertida, realizada a través del transistor MOSFET-P SI2323, el mismo posee la característica de poseer una baja resistencia Drain-Source y así evitar la disipación de potencia. La tensión de alimentación externa provee la tensión al regulador de 5V y al voltímetro, la mínima tensión de alimentación externa se encuentra delimitada por el regulador en 9V (ya que por debajo de 9V no funcionará idealmente) y la máxima por el fabricante del voltímetro en 15 V.

Por último, la llave S2 enciende o apaga el medidor de campo magnético.

3.5. Voltímetro

En el caso del voltímetro, se eligió el modelo LASCAR DPM-3AS-BL. Dicho dispositivo tiene un voltaje máximo de 200 mV de entrada, es por esto que se debe realizar una atenuación previa del voltaje de salida provisto por el sensor hall (el cual va de 0.5 V a 4.5 V). Mediante esta atenuación, se obtienen valores de voltaje relativos a los valores de campo magnético en mT, es decir que, si se mide en el voltímetro el numero 80, la lectura sera de 80 mT. Una de las principales razones de elección de este voltímetro es la capacidad de agregar o eliminar puntos decimales a la magnitud medida mediante la conexión de los contactos DP1, DP2 y DP3 con el punto XDP. Con esta función, y mediante el uso de una llave, se puede realizar el cambio del punto decimal según el rango de trabajo y la precisión deseada. Debido a las características del display se sabe que al estar establecida la conexión DP1-XDP el mayor valor posible a medir sera 19.99, y en el caso de la conexión

DP2-XDP, el valor sera de 199.9. Este ultimo coincide con el limite de voltaje máximo del voltímetro, dado que mediante el circuito previamente explicado se sabe que el voltímetro recibirá valores en el orden de los mV, por lo tanto el contacto DP3 quedara inutilizado. Esta característica del display del voltímetro permite visualizar dos decimales, mediante la conexión con el contacto DP2, en el rango mas chico de medición, y un solo decimal, mediante la conexión con el contacto DP1, para el rango mas grande. Se realizan estos dos conexiones con el objetivo de obtener la mayor exactitud posible del valor provisto por el voltímetro y, teniendo en cuenta que el primer dígito del display sera siempre 1.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

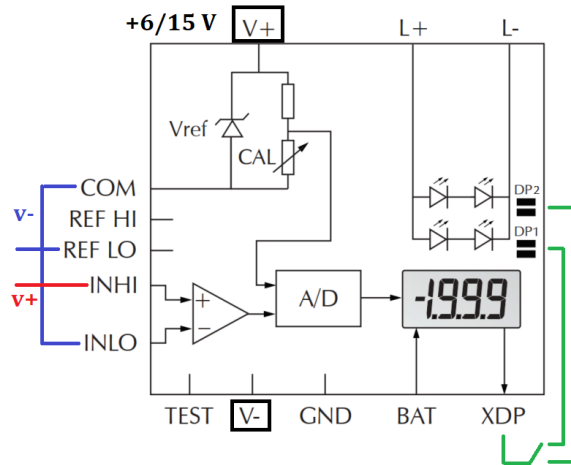


Figura 8: Voltímetro utilizado.

Cabe destacar que este voltímetro funciona con un rango de tensiones de +6 a 15 V, es por esto que se puede hacer uso de una alimentación externa dentro de estos rangos, y tiene un funcionamiento en el rango de temperaturas de 0 a 50 °C, lo cual fijara el rango de temperaturas de trabajo del medidor de campo magnético en si.

3.6. Calculo de incertidumbre

Para el calculo de incertidumbre se toman los errores de tanto el sensor Hall y el voltímetro, los cuales corresponden al 1.5 % y al 0.1 % + 1 cuenta respectivamente. En el caso de la incertidumbre de las resistencias del circuito, esta puede ser despreciada, debido a que previo a cada medición se realiza una calibración para cada punta, logrando así que la medición no se vea afectada por estos componentes. Se realiza a continuación el calculo de la incertidumbre para los valores obtenidos por el medidor de campo magnético para cada una de las puntas de medición. Cabe destacar que el error asociado al sensor Hall es un error lineal dependiente del valor de sensibilidad por lo que no es valido extrapolar la incertidumbre de una punta a otra. A su vez, se realiza el calculo con el valor máximo del rango de cada punta ya que este arrojará el voltaje mas alto de salida del sensor Hall y por lo tanto la incertidumbre mas grande en dicho rango.

Se comienza con el caso de la punta de rango de ± 199.9 G. Esta punta posee una sensibilidad de 5mV/G, por lo que el voltaje de salida del sensor Hall sera de 0.9995 V, suponiendo un campo máximo de 199.9 G o 19.99 mT. Utilizando la ecuación siguiente se obtiene el valor de incertidumbre del sensor.

$$\mu_{SH} = \frac{V_{outSH} * 0,015}{\sqrt{3}}$$

$$\mu_{SH199,9G} = 8,66mV$$

Con el resultado en mV podemos hallar su correspondiente en Gauss mediante la relación de sensibilidad del sensor Hall de cada punta, en este caso 5 mV/G.

$$\mu_{SH199,9G} = 1,732G$$

Ahora se busca la incertidumbre del voltímetro. En el caso de 199.9 G, el voltímetro mostrará en su display idealmente una tensión de 19.99 mV, con la utilización del DP2, por lo que se utiliza este valor para obtener su incertidumbre.

$$\mu_{V_{olti}} = \frac{V_{in} * 0,001}{\sqrt{3}} + 0,01mV$$

$$\mu_{V_{olti}} = 0,0215mV$$

Luego, se halla el correspondiente valor en Gauss. Como se explica previamente, este valor mostrado en mV corresponde al valor de campo magnético en mT, por lo que para obtener su correspondiente en G simplemente se debe multiplicar por 10.

$$\mu_{V_{olti}} = 0,215G$$

Finalmente se calcula la incertidumbre combinada, mediante el uso de la siguiente formula.

$$\mu_c^2 = \mu_{SH}^2 + \mu_{V_{olti}}^2$$

$$\mu_{c199,9G} = 1,75G$$

Realizando el mismo razonamiento para el otro rango, teniendo en cuenta ahora un valor de sensibilidad del sensor de 0.5 mV/G, se obtiene el siguiente resultado.

$$\mu_{c1999,9G} = 17,45G$$

Cabe destacar que como el error del sensor Hall es lineal, al medir magnitudes más pequeñas el error del voltímetro será el que determine la incertidumbre total. Es por esto también que se desea implementar un sistema de 2 puntas intercambiables con distintas sensibilidades a modo de realizar la mejor medición posible.

4. RESULTADOS

El diseño de la PCB tiene un tamaño de 88 mm de largo por 35 mm de ancho, consta de una sola capa de cobre, un tamaño de pista de 0.5 mm, 4 jumpers y 7 puntos para testear los cuales se detallan a continuación en la figura 9.

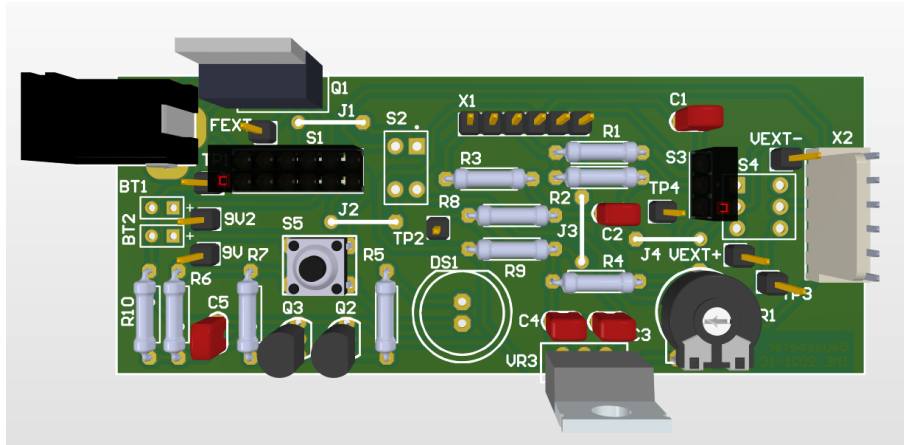


Figura 9: Diseño en PCB 3D.

Designador	Funcionalidad
TP1	Ground (0V)
9V2	Tensión de batería (9V)
9V	Tensión de batería (9V)
FEXT	Tensión de fuente externa (9V-15V)
TP2	Tensión de alimentación (5V)
TP3	Tensión de offset (2.5V)
TP4	Tensión de referencia (4.5V)

Tabla 2: Puntos para testeo

La placa se sostiene mediante el conector para fuentes de alimentación externa, las llaves y el regulador VR3 el cual se debe unir al chasis para proveer una correcta disipación térmica. A la izquierda se encuentran BT1 y BT2 los cuales serán conectados a las baterías, en la parte superior central se encuentran los pines correspondientes a la punta de medición cuyo conector será colocado directo al chasis del gabinete y luego cableado (lo mismo que para el resto de llaves). El conector X2 que se encuentra en la derecha corresponde a las entradas del voltímetro.

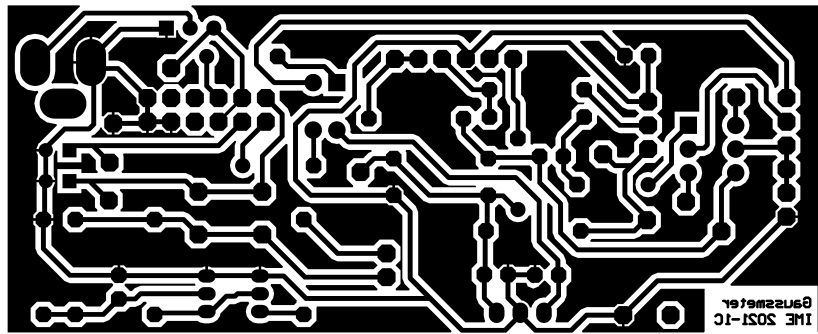
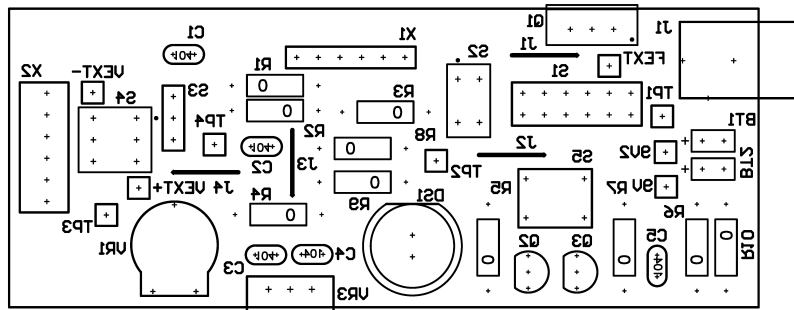


Figura 10: Bottom layer de la PCB.

La placa posee un plano referido a tierra junto al nombre y fecha que sirven para controlar y comprobar las distintas versiones a desarrollar. La capa superior se encuentra espejada para luego ser transferida a la placa, posee los designadores y la guía para realizar los agujeros.



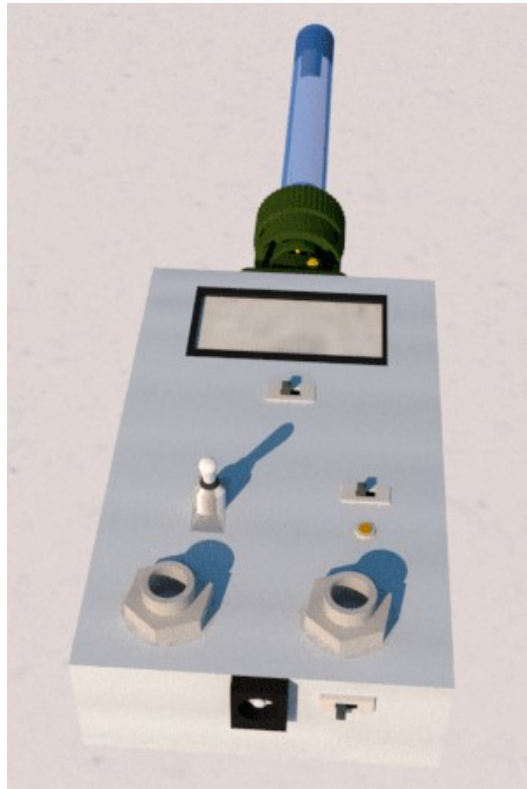


Figura 12: Render en 3D del gabinete. Imagen ilustrativa.

En la Figura 13 se puede ver una ilustración mas del medidor de campo magnético, esta vez focalizada en la punta de medición.

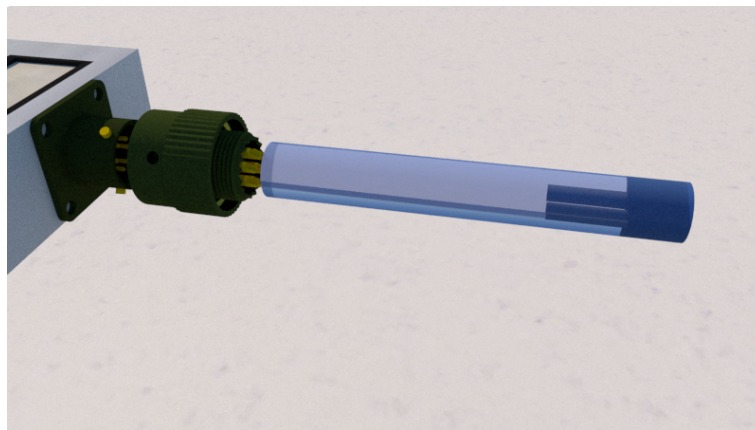


Figura 13: Render en 3D del gabinete. Imagen ilustrativa.

Por último, en la Tabla 3 se consiguen las siguientes especificaciones técnicas para los dos tipos de sensibilidades elegidas.

Especificación	Valor
Rango T°	0C°: 50C°
Frecuencia max.	20 kHz
Tensión alimentación	9V : 15V
Tensión salida Max.	200 mV
Rango medición ₁	2G : \pm 199.9 G
Rango medición ₂	3G : \pm 1999.9 G

Tabla 3: Especificaciones técnicas.

5. CONCLUSIONES

Se llevo a cabo el desarrollo de un circuito correspondiente a un medidor de campo magnético con rangos de medición de 2G a 1999.9 G, con un rango de frecuencias de hasta 20 kHz, y un rango de temperaturas de operación de 0 a 50°C con una incertidumbre en valores máximos cercana al 1 % del valor medido. Se pudo verificar el correcto funcionamiento del mismo mediante las distintas simulaciones realizadas en computadora.

Un paso importante en este tipo de trabajos es llevar a cabo el proceso experimental del armado y constatar que los resultados finales del medidor coincidan con lo esperado y planteado a lo largo del informe. Además, es en este tipo de etapas es en las que se observan y detallan la mayor cantidad de fallas en lo que respecta a su uso y practicidad, como así también surgen las posibles mejoras y/o cambios. Es por esto que queda sujeto a futuro el armado y prueba del medidor de campo magnético.

Para futuros trabajos se propone la implementación de un segundo método que permita aumentar el rango de frecuencia, ya que con este tipos de sensores no se puede estar por encima de 20 kHz el cual resulta un rango acotado de trabajo. Además, se propone implementar más protecciones al circuito en caso de fuentes externas así como también una función que permita fijar el valor medido en la pantalla. Como agregado, se debe considerar implementar una calibración para 0 G/mT, de este modo se calibra tanto el fondo de escala como el campo magnético constante que se encontrará en todas las mediciones a realizar. Por último, dado que el correcto funcionamiento del sensor de efecto hall depende estrechamente de la tensión de alimentación de 5V, la mejor forma de entregar una tensión constante es utilizar un integrado que proporcione una tensión de referencia de precisión (por ej.: LT1389), por lo tanto, debería de implementarse su uso en lugar del regulador de tensión.

Referencias

- [1] Resolución enre 1724/1998. boletín oficial n° 29.038, lunes 7 de diciembre de 1998, pp. 25-26. Technical report.
- [2] Efecto Hall. <http://www.sc.edu.es/sbweb/fisica3/magnetico/hall/hall.html>.
- [3] K.N. Henrichsen L. Bottura. Field measurements. *CERN, Geneva, Switzerland*, Dec, 2002.
- [4] Allegro Microsystems. *A1308 and A1309 Datasheet*.
- [5] Lascar Electronics. *DPM 3AS-BL Datasheet*.
- [6] Fairchild. *MC7805 Datasheet*.

A. APÉNDICE

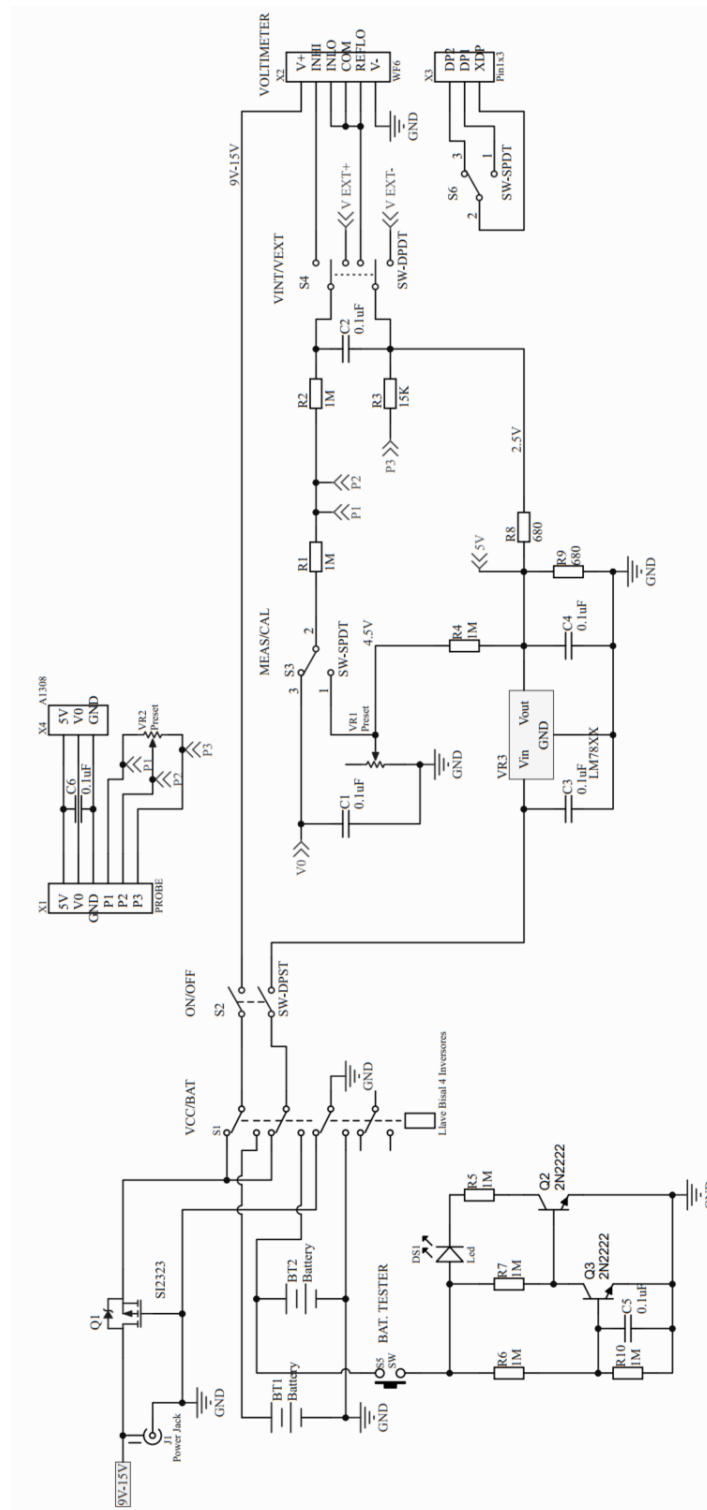


Figura 14: Circuito completo.

Descriptor	Comentario	Designador	Cantidad	Precio [USD]
Pines 1x1	Pines	TP1, TP2, TP3, TP4,	9	0.1
Batería	Batería	BT1, BT2	2	2.56
Capacitores	uF Multicapa Y5V 50V	C1, C2, C3, C4, C5	5	1
LED 5mm	Led	DS1	1	0.5
Jack alimentación	Jack alimentación	J1	1	0.58
Puentes	Comment	J1, J2, J3, J4	4	0
Mosfet Canal-P	SI2323	Q1	1	0.6
Transistor NPN	2N2222	Q2, Q3	2	0.6
Resistencia 1/4W 5%	1M	R2, R4, R5, R6, R7, R8	10	0.26
Llave 3PDT	3PDT	S1	1	3.68
Llave DPST	SW-DPST	S2	1	0.8
Llave SPDT	SW-SPDT	S3	2	4
Llave DPDT	SW-DPDT	S4	1	2.57
Tact Switch 6x6x5.1mm	SW	S5	1	0.8
Preset Horizontal	Preset	VR1	2	6
LM7805 Positive Voltage Regulator	LM7805	VR3	1	0.52
Pin1x6 Macho Recto	PROBE	X1	1	0.1
Conector WF6	WF6	X2	1	0.1
Gabinete			1	8.24
Tubo acrílico			1	0.4
Conector Amphenol 62IN macho			1	3.27
Conector Amphenol 62IN hembra			1	3.18
Sensor A1308			3	6.21
Clip p/Batería			2	0.94
Voltímetro	LASCAR DPM-3AS-BL			48.71
TOTAL				95.72

Figura 15: Tabla de componentes.