

## Medición de Resistencias de Valores Óhmicos Bajos por Método de Cuatro Hilos

Schöninger Maximiliano Sebastián <sup>a\*</sup>, Ayala David Alejandro <sup>b</sup>, Statkiewicz Lucas Agustín <sup>c</sup>, Olsson Jorge Alberto <sup>d</sup>, Anocibar Héctor Rolando <sup>e</sup>

<sup>a, b, c, d y e</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina. -  
Departamento de Ingeniería Electrónica.

<sup>d y e</sup> Proyecto de Investigación: 16/I142, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: maxiseba7@gmail.com, davidd.ayalaa.04@gmail.com, lucasstatkiewicz@gmail.com,  
jorgealbertoolsson@gmail.com, anocibar@gmail.com

### Resumen

El objetivo de este trabajo ha sido implementar un prototipo de medición de resistores de bajo valor óhmico, en un rango de uno hasta cien ohms, utilizando un amplificador operacional para el control y un transistor bipolar para la etapa de potencia, siguiendo el método estándar de medición de cuatro hilos.

Para el desarrollo del mismo se establecieron tres etapas fundamentales. Primeramente, se diseñó el circuito mediante cálculo y consideraciones teóricas siguiendo las recomendaciones de la cátedra de Mediciones Electrónicas de la Facultad de Ingeniería. En relación a ello se simuló el mismo en un software específico de electrónica, sujeto a estos fines. Seguidamente se dispuso el modelo circuital en una placa experimental. Luego se diseñó y construyó el circuito impreso para el ensamble de los componentes, ajuste y puesta a punto.

Con el sistema propuesto, asumiendo como verdadero valor, el nominal del resistor a medir, se obtuvieron incertidumbres menores al uno por ciento, en los extremos del rango de medición.

Del análisis de los resultados obtenidos se concluyó que se logró cumplir los objetivos de implementar un sistema de medición de resistores de bajo valor óhmico, con bajos costos y componentes de fácil adquisición e incertidumbres de medición menores que la mayoría de los instrumentos comerciales.

**Palabras Clave** – Mediciones electrónicas, Método cuatro hilos, Método Kelvin, Resistencias, Óhmetro.

## 1 Introducción

La medición de resistencias puede realizarse a través de dos métodos:

- Método de dos hilos.
- Método de cuatro hilos.

### 1.1 Método de dos hilos

Con el método de dos hilos pueden realizarse mediciones de resistencias de  $100 \Omega$  a  $10 M\Omega$ . En este sistema se puede identificar una corriente de ensayo ( $I$ ), la cual circula a través de los cables de prueba hasta la resistencia bajo medición ( $R$ ). El instrumento mide la caída de tensión entre sus bornes de salida, en consecuencia, calcula el valor del resistor mediante la aplicación de la Ley de Ohm (1).

$$V = IR \quad (1)$$

Pero este método conlleva un gran problema al medir resistores de bajo valor óhmico. La problemática surge debido a que los cables de prueba no son conductores perfectos, sino que presentan una pequeña resistencia al paso de la corriente eléctrica. En consecuencia, se generan caídas de tensiones en ellos ( $V_{RLead}$ ) al circular una corriente, como se muestra en la Fig. 1 [1].

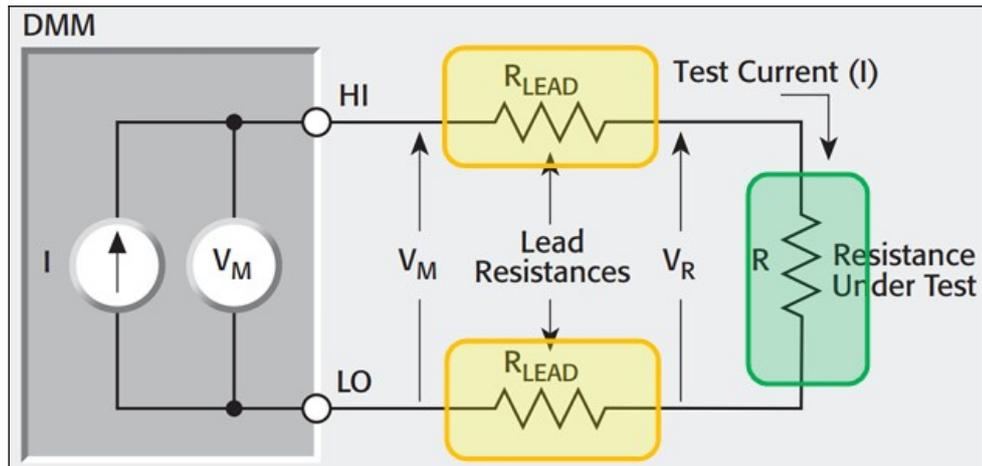


Fig. 1. Esquema método dos hilos [1].

La tensión que se espera medir está dada por (2):

$$V_M = V_R = IR \quad (2)$$

Y al despejar, se obtiene el valor del resistor (3):

$$R_{Med} = \frac{V_M}{I} = R \quad (3)$$

Pero la verdadera tensión medida se obtiene de (4):

$$V_M = V_R + 2V_{R_{LEAD}} = IR + 2(IR_{LEAD}) \quad (4)$$

En consecuencia, el valor de resistencia medido es (5):

$$R_{Med} = \frac{V_M}{I} = R + 2R_{LEAD} \quad (5)$$

La resistencia de los cables se encuentra en un rango de 1 a 10  $m\Omega$ . Por lo cual, si el resistor bajo medición es menor a 100  $\Omega$ , la caída de tensión sobre los cables de prueba no se puede despreciar, introduciendo de este modo errores en la medición [1].

### 1.2 Método de cuatro hilos

El método de medición de cuatro hilos o método de Kelvin [2] es preferible para valores de resistencia menores a 100  $\Omega$ . Estas mediciones se realizan utilizando cuatro cables separados, de los cuales, dos son conocidos como cables de corriente y transportan la corriente a través del resistor bajo medición (Rx). Los otros dos cables, denominados como de detección o de sensado, se utilizan para detectar la caída de voltaje sobre Rx. Por estos últimos circula una pequeña corriente, del orden de los pA, por lo cual, la caída de tensión en dichos cables es insignificante y puede ser despreciada. Este método de medición brinda precisión y buenos resultados ya que elimina las contribuciones de las resistencias de cableado y los potenciales de contacto sobre la medición final de la resistencia en cuestión. Cumpliendo así la relación establecida por (2) y (3). Esto se puede apreciar en la Fig. 2.

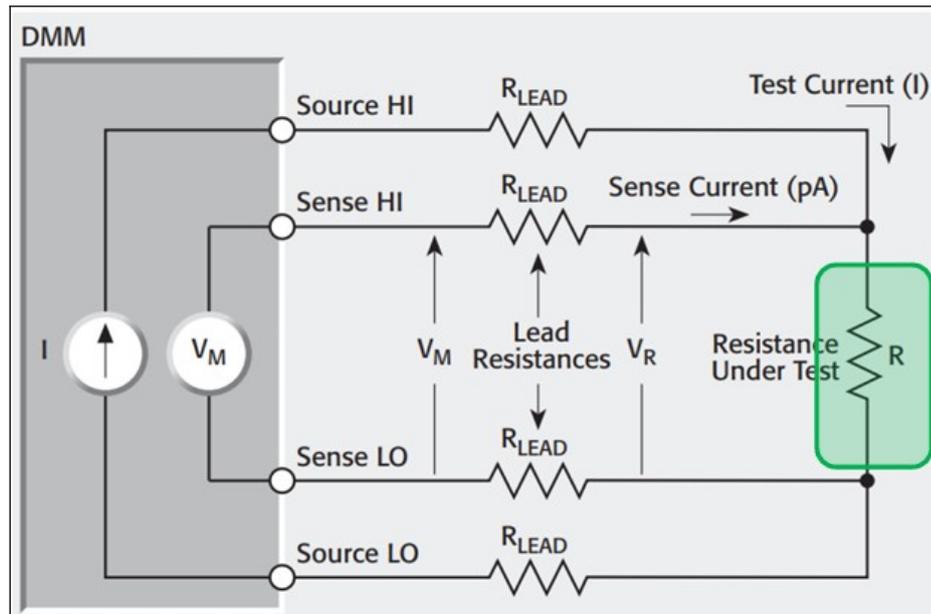


Fig. 2. Esquema método cuatro hilos [1].

Un claro ejemplo de dispositivo que utiliza el método de Kelvin son los micro-óhmetros. Estos son equipos diseñados para facilitar la medida de resistencias de valores óhmicos bajos, del orden de  $m\Omega$  o incluso  $\mu\Omega$ . En definitiva, están constituidos por una fuente de corriente estable y un medidor de tensión de precisión. Un buen ejemplo es el Óhmetro PDRM-10A. Este instrumento permite la medición de resistencias en un rango de  $0,01 \mu\Omega$  a  $200 \Omega$ , siendo el óhmetro más preciso y de mayor resolución del mercado [3].

### 1.3 Medidor de resistencias en un rango de 1 a 100 ohms

Dada la gran incertidumbre generada por los multímetros al medir resistores de bajo valor óhmico, y a los altos costos de los micro-óhmetros, es conveniente realizar un esquema circuital para la medición de este tipo de resistores, a partir de un transistor bipolar, un amplificador operacional (AO) de precisión OP07 [4], un circuito integrado LM336 [5], el cual brinda una tensión de referencia de muy buena calidad de  $2,5 V$ , ajustado mediante un potenciómetro de  $10 k\Omega$  y otros componentes pasivos. Este artículo tiene como objetivos diseñar e implementar un dispositivo de medición de resistencias en un rango de  $(1-100) \Omega$ , con ayuda de un multímetro comercial. El circuito se basa en la circulación de una corriente conocida y estable  $100 mA$ , la cual circula por el resistor bajo medición ( $R_x$ ). En él se realiza la medición de su caída de tensión ( $V_x$ ) mediante un multímetro y el valor del resistor se obtiene mediante (6) al aplicar la Ley de Ohm.

$$R_x = \frac{V_x}{100 mA} \quad (6)$$

## 2 Circuito propuesto

Para la medición de resistencias en un rango de  $1 \Omega$  a  $100 \Omega$  se propuso el circuito de la Fig. 3.

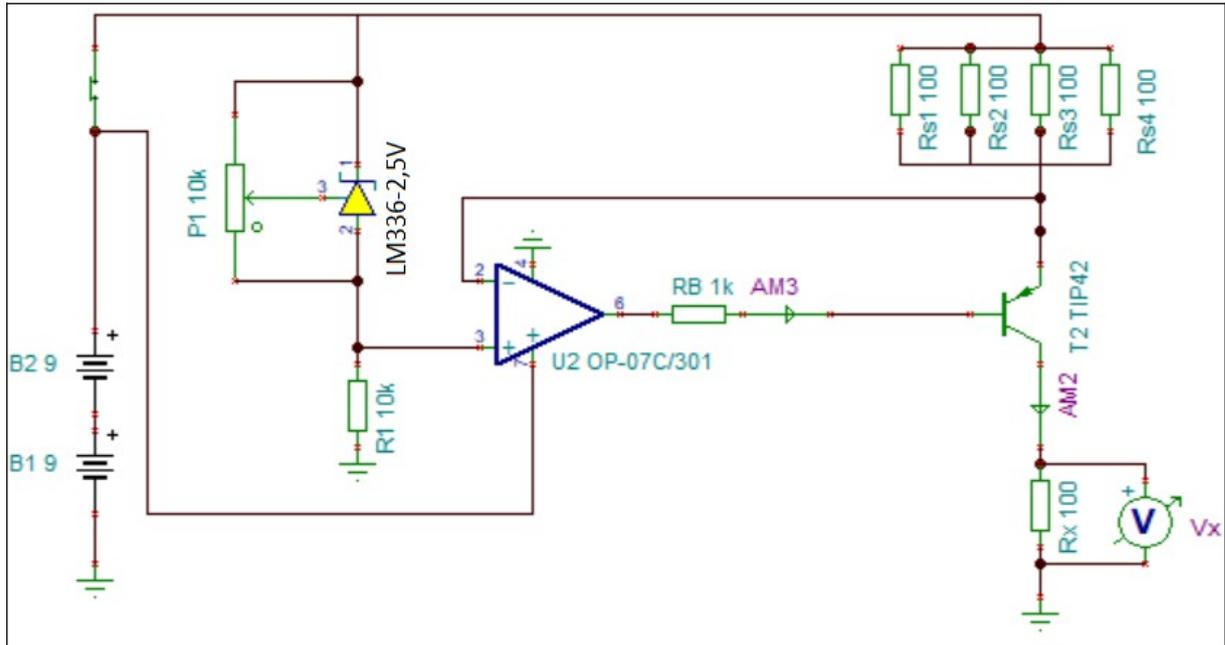


Fig. 3. Circuito propuesto.

Para su diseño se utilizaron los siguientes componentes:

- Amplificador operacional: OP07.[4]
- Regulador de tensión: LM336-2,5 V. [5]
- Transistor bipolar: TIP42. [6]
- Dos baterías de 9 V.
- Interruptor sin retención. [7]
- Potenciómetro  $10 \text{ k}\Omega$ . [8]
- Resistores:
  - R1: $10 \text{ k}\Omega$ .
  - Rb: $1 \text{ k}\Omega$ .
  - 4 Rs: $100 \Omega$ .

### 3 Consideraciones teórico-prácticas

#### 3.1 Alimentación

Para la alimentación del circuito ( $V+$ ) es necesario tener en cuenta la máxima resistencia que se desea medir, una caída de tensión colector-emisor de aproximadamente  $3 \text{ V}$  que presenta el transistor, ya que se espera que el mismo trabaje en zona activa, y una estimación de una caída de voltaje de  $2,5\text{V}$  sobre el resistor de sensado.

La tensión de alimentación necesaria se obtuvo en (8) mediante la segunda Ley de Kirchhoff (7), al recorrer la malla desde la batería (B1) hasta la resistencia bajo medición ( $R_x$ ).

$$V_{+} - V_{RS} - V_{CE} - I * R_x = 0 \quad (7)$$

$$V_{+} = V_{RS} + V_{CE} + I * R_x = 2,5 \text{ V} + 3 \text{ V} + 100 \text{ mA} * 100 \Omega = 15,5 \text{ V} \quad (8)$$

Teniendo en cuenta el resultado anterior se optó por energizar el circuito con una alimentación de 18V a través de dos baterías conectadas en serie.

### 3.2 Resistor de sensado

Aprovechando la propiedad que tienen los amplificadores operacionales, que funcionan de modo que la tensión de la entrada no inversora es igual a la de la entrada inversora (9), se obtiene el valor del resistor de sensado ( $R_s$ ) por medio de (10), (11) y (12) [9].

$$V_i = V_I \quad (9)$$

$$V_i = V_{+i-2,5V} = (18-2,5)V = 15,5V \quad (10)$$

$$V_{R_s} = I R_s = V_{+i-V_I} \quad (11)$$

$$R_s = \frac{V_{+i-V_I}}{I} = \frac{(18-15,5)V}{100mA} = 25\Omega \quad (12)$$

Variar el valor del resistor de sensado para alcanzar un valor comercial de la serie E12, implica variar la corriente de referencia, por lo cual, se adoptaron cuatro resistores de 100  $\Omega$  en paralelo, de este modo se alcanzó el valor de resistencia deseado y también se disminuyó la disipación del propio resistor de sensado.

### 3.3 Transistor

Al seleccionar un transistor es indispensable conocer la potencia que debe disipar y a su vez, si el mismo requiere de un disipador. La potencia obtenida en (13) es la estimada para el peor caso de disipación del transistor, esto se da cuando no hay ninguna carga ( $R_x$ ):

$$P = I V_{CE} = I_s * \dot{V} \quad (13)$$

Teniendo en cuenta el peor caso de disipación, se seleccionó el transistor TIP42, el cual cuenta con una capacidad de disipación de 2 W trabajando a 25 °C.

Mediante datasheets [6] se obtuvieron los siguientes datos:

- Máxima temperatura de funcionamiento:  $T_{Jmax}: 150\text{ }^\circ\text{C}$
- Resistencia Juntura-Ambiente:  $\theta_{JA}: 57\text{ }^\circ\frac{\text{C}}{\text{W}}$

Para determinar si se requiere de un disipador hay que considerar que cuando estos dispositivos se encuentran funcionando a temperaturas mayores a 25 °C, la capacidad de disipación del dispositivo disminuye acorde a un factor de degradación [10].

Suponiendo que el transistor puede estar trabajando a una temperatura ambiente de 50°C, con (14) se calculó la máxima potencia que puede disipar el transistor en esas condiciones:

$$P_{max} = \frac{T_J - T_{amb}}{\theta_{JA}} = \frac{(150 - 50)^\circ C}{57^\circ C/W} = 1,75 W \quad (14)$$

Dado que la potencia máxima (14) que puede disipar el componente en las circunstancias dadas es mayor que la estimada para el peor caso (13), se concluyó que el transistor puede funcionar correctamente sin necesidad de un disipador.

Sin embargo, teniendo en cuenta la dependencia de los componentes con la temperatura, se incluyó un pulsador sin retención, a modo de inyectar la corriente de 100 mA por un tiempo corto (menor a 10 segundos) suficiente para la lectura en el voltímetro de la tensión sobre la resistencia bajo medición. Asimismo, el interruptor hace posible la alimentación mediante baterías, lo que es de gran importancia, ya que posibilita el realizar un circuito portable.

### 3.4 Resistor de base

El resistor de base (Rb) cumple la función de polarizar el transistor y limitar la corriente de base. Este resistor tiene un valor máximo delimitado por la tensión de alimentación según (15), donde una vez superado el circuito deja de funcionar correctamente.

$$R_B = \frac{V_{+} - V_{RS} - V_{BE} - V_{SAO}}{I_B} \quad (15)$$

Para el circuito propuesto se implementó un resistor de base de 1 kΩ como limitador de corriente.

## 4 Simulaciones

Luego de la etapa de cálculo y diseño se simuló el circuito en los valores extremos del rango de medición, a modo de comprobar su correcto funcionamiento. Para este procedimiento se utilizó el software TINA-TI. Los resultados de estas simulaciones se aprecian en las Fig. 4 y Fig. 5.

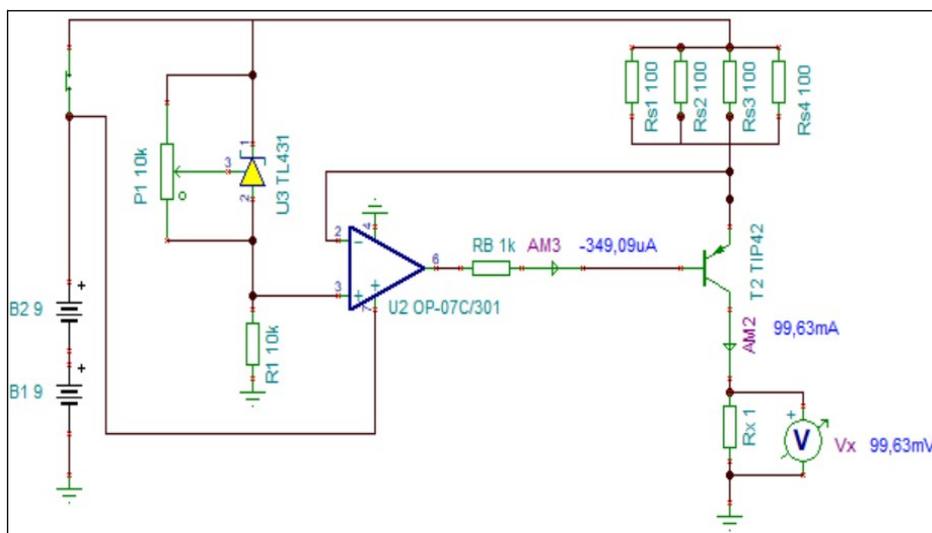


Fig. 4. Simulación (Rx=1Ω).

La lectura del voltímetro de la Fig. 4 indica una caída de tensión de 99,63 mV, reemplazando dicha tensión en (6) se obtuvo el valor del resistor bajo medición (16):

$$R_x = \frac{V_x}{100 \text{ mA}} = \frac{99,63 \text{ mV}}{100 \text{ mA}} = 996,3 \text{ m}\Omega \quad (16)$$

Asumiendo como verdadero valor convencional el nominal del resistor, el error producido durante la medición está dado por (17):

$$\varepsilon \% = \frac{R_x - R_x'}{R_x} = \frac{1 \Omega - 996,3 \text{ m}\Omega}{1 \Omega} * 100 = 0,37 \% \quad (17)$$

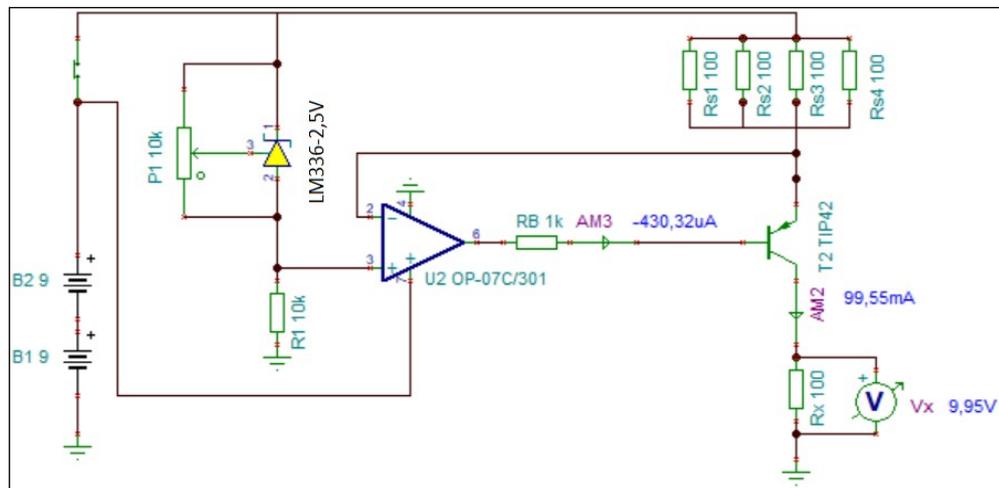


Fig. 5. Simulación ( $R_x=100\Omega$ ).

La lectura del voltímetro de la Fig. 5. indica una caída de tensión de 9,95 V, reemplazando dicha tensión en (6) se obtuvo el valor del resistor bajo medición (18):

$$R_x = \frac{V_x}{100 \text{ mA}} = \frac{9,95 \text{ V}}{100 \text{ mA}} = 99,5 \Omega \quad (18)$$

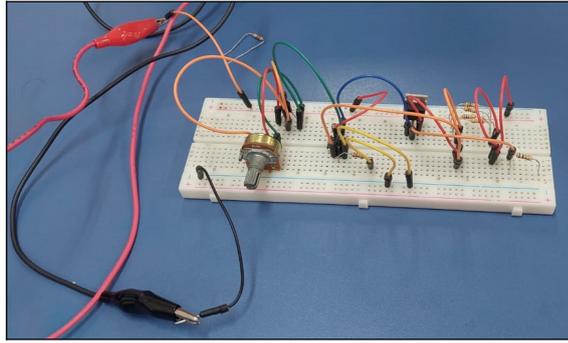
Asumiendo como verdadero valor convencional el nominal del resistor, el error producido durante la medición está dado por (19):

$$\varepsilon \% = \frac{R_x - R_x'}{R_x} = \frac{(100 - 99,5) \Omega}{100 \Omega} * 100 = 0,5 \% \quad (19)$$

Analizando los resultados obtenidos en (17) y (19), el máximo error se obtuvo al estar en el rango máximo de medición.

## 5 Ensayo en laboratorio

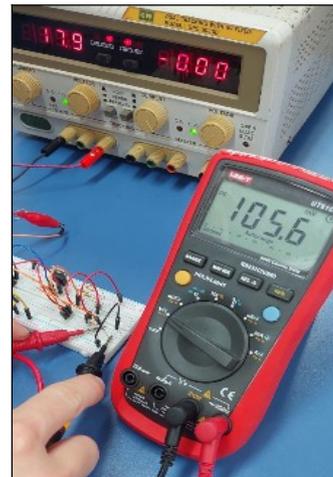
Una vez verificado el correcto funcionamiento del circuito mediante simulación en un software específico de electrónica, se ensayó el mismo sobre una placa experimental con los instrumentos adecuados en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la ciudad de Oberá, Misiones. Esto se puede observar en las Fig. 6, Fig. 7 y Fig. 8.



**Fig. 6. Ensayo del circuito en laboratorio.**



**Fig. 7. Medición de corriente.**



**Fig. 8. Medición de V(Rx).**

En el laboratorio se realizó la medición de una resistencia de  $1 \Omega$ . Por un lado, como se puede observar en la Fig. 7, se obtuvo la corriente deseada de  $100 \text{ mA}$ , la cual puede ser ajustada mediante el potenciómetro implementado en el circuito. También se tomó la medida de la caída de tensión sobre el resistor, como se puede apreciar en la Fig.8. Con los datos de tensión y corriente citados anteriormente, al remplazarlos en (6) se obtuvo el valor del resistor bajo medición (20):

$$R_x = \frac{V_x}{I_x} = \frac{105,6 \text{ mV}}{100 \text{ mA}} = 1,056 \Omega \quad (20)$$

## 6 Diseño de PCB

Finalmente, en las Fig. 9, Fig. 10 y Fig.11 se puede apreciar cómo se diseñó un circuito impreso, en un software específico de diseño y armado de PCBs, para ensamblar los componentes de forma permanente.

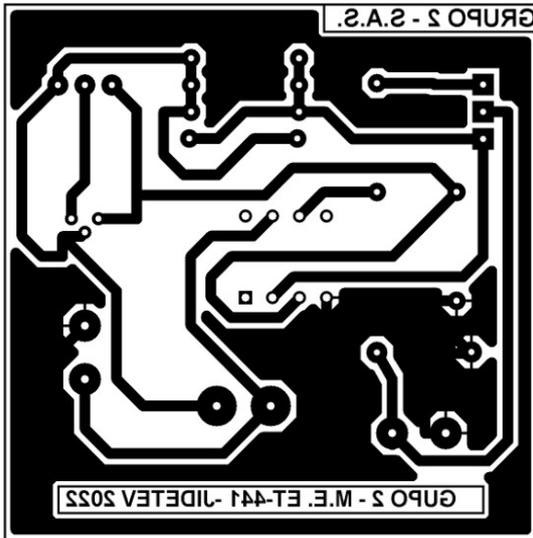


Fig. 9. Diseño posterior del PCB.

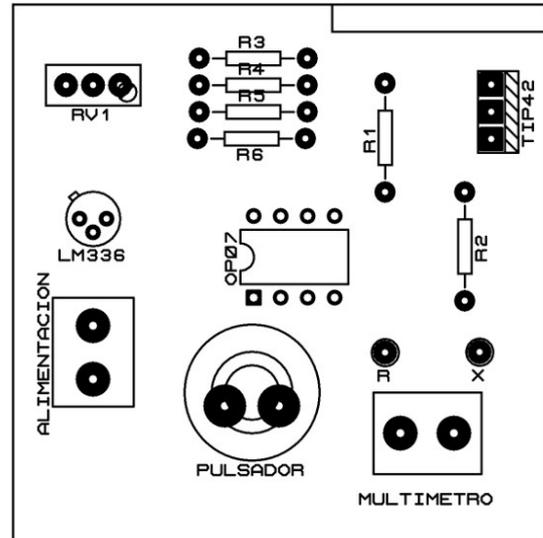


Fig. 10. Diseño frontal del PCB.

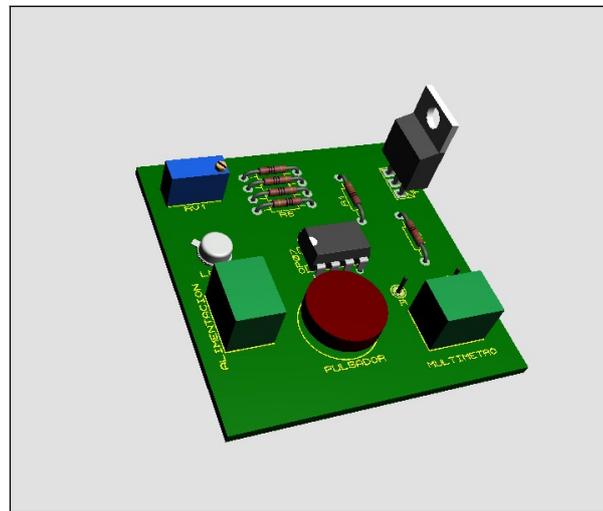


Fig. 11. Diseño en 3D del PCB.

## 7 Conclusiones

Para mediciones de resistores bajo valor óhmico es recomendable limitar el método de dos hilos a mediciones orientativas, ya que pueden contener resultados erróneos. Por el contrario, es recomendable utilizar el método de cuatro hilos, ya que brindan mejores resultados y debido a su precisión, este sistema es utilizado en detectores de precisión como sensores de temperatura resistivos y galgas extensiométricas. Para el circuito que se ha propuesto se debe tener en cuenta el rango de resistencia se desean medir, ya que este depende de la tensión de alimentación y corriente a utilizar para su correcto funcionamiento. Analizando los resultados obtenidos, se concluye que se lograron cumplir los objetivos del proyecto, de implementar un sistema de medición de resistores de bajo valor óhmico, con bajos costos, componentes de fácil adquisición e incertidumbres de medición menores que la mayoría de los instrumentos comerciales. Quedando pendiente a futuro la implementación del PCB y su correspondiente armado como prototipo.

## 8 Referencias

- [1] Anocibar H. R., “Conversión Tensión a Corriente-Ohmetro”, Agosto 7, 2022. [Online]. Disponible: <https://cloud.fio.unam.edu.ar/index.php/s/BrkkFnbHDwwEQQ>
- [2] A. P. Schuetze, W. Lewis, C. Brown, and W. J. Geerts, “A laboratory on the four-point probe technique”, Am. J. Phys. 72 149 (2004).
- [3] Amperis Products SL, “Micróhmetro DRM-10A. Manual de usuario”, Agosto 7, 2022. [Online]. Disponible: <https://amperis.com/sites/default/files/pdf/Manual-Amperis-DRM10A.pdf>
- [4] Texas Instruments, “OP07 Precision Operational Amplifiers”, Agosto 7, 2022. [Online]. Disponible: <https://www.ti.com/lit/gpn/op07c>
- [5] Fairchild Semiconductor, “LM336-2.5/LM336B-2.5 Programmable Shunt Regulator”, Agosto 7, 2022. [Online]. Disponible: <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/85049/FAIRCHILD/LM336Z2.5.html>
- [6] ON Semiconductor, “TIP42 / TIP42C PNP Epitaxial Silicon Transistor”, Agosto 7, 2022. [Online]. Disponible: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/tip42c-d.pdf>
- [7] ZF Electronics, “Sealed Pushbutton”, Agosto 7, 2022. [Online]. Disponible: [https://www.mouser.es/datasheet/2/833/Pushbutton\\_KF\\_Datasheet\\_08\\_11\\_17-2079774.pdf](https://www.mouser.es/datasheet/2/833/Pushbutton_KF_Datasheet_08_11_17-2079774.pdf)
- [8] Vishay Spectrol, “1/2" (12.7 mm) Conductive Plastic and Cermet Potentiometer”, Agosto 7, 2022. [Online]. Disponible: [https://www.mouser.es/datasheet/2/427/VISH\\_S\\_A0004853104\\_1-2569387.pdf](https://www.mouser.es/datasheet/2/427/VISH_S_A0004853104_1-2569387.pdf)
- [9] Anocibar H. R., “Introducción a los Amplificadores Operacionales y sus principales aplicaciones”, Agosto 7, 2022. [Online]. Disponible: <https://cloud.fio.unam.edu.ar/index.php/s/oD2AM53MecfKY6P>
- [10] Anocibar H. R., “Disipación de Potencia”, Agosto 7, 2022. [Online]. Disponible: <https://cloud.fio.unam.edu.ar/index.php/s/mWR3nCa9Co2DB8y>

## 9 Agradecimientos

Este trabajo ha sido llevado a cabo gracias al apoyo de la Cátedra de Mediciones Electrónicas. Los autores agradecen a los ingenieros que la componen, tanto la oportunidad brindada como su colaboración y predisposición en la preparación de este artículo.