



JIDeTEV

Jornadas de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Extensión, Vinculación y Muestra de la Producción



JIDeTEV- Año 2022 -ISSN 2591-4219

Módulo Multifunción Generador de Lazo de Corriente o Tensión para Ensayo de Instrumentación Industrial Analógica

Cohen Ezequiel Agustín ^a, Nerenberg Edgardo Ariel * ^b, Villaverde Gustavo José ^c, Ing. Olsson Jorge Alberto ^d, Dr. Ing. Anocibar Hector Rolando ^e

^{a b c d e} Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Departamento de Ingeniería Electrónica, Oberá, Misiones, Argentina.

^{d e} Proyecto de Investigación: 16/I142, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.

^e GID-IE, FI-UNaM, Departamento Ingeniería Electrónica, Oberá, Misiones, Argentina.

ezecohen8@gmail.com, arielnereberg@gmail.com, gustavo9277@gmail.com,
jorgealbertoolsson@gmail.com, anocibar@gmail.com

Resumen

Este proyecto fue realizado para implementar y ensayar un módulo multifunción, probador de lazo de corriente o de tensión para comprobación de instrumentación industrial analógica, que fuera desarrollado por la cátedra de Mediciones Electrónicas 2022 del departamento de Ingeniería Electrónica de la UNaM.

Para el prototipo se utilizaron amplificadores operacionales de uso general y bajos costos, como generador de lazos de corriente de entre 0 a 20 mA y lazos de tensión de 0 a 10 V.

Primeramente fue necesario realizar los cálculos pertinentes, luego el circuito fue simulado con software específico, para finalmente armar el módulo para ensayar en el laboratorio, donde se obtuvieron los errores e incertidumbre de su uso, pudiendo observar que existen concordancias entre los cálculos y las mediciones físicas realizadas.

Se pudo concluir por medio de los cálculos de incertidumbres y errores que utilizando dos amplificadores operacionales de uso general y sus componentes asociados, es posible realizar un dispositivo generador de lazos de corriente y/o tensión de calidad aceptable para usos industriales.

Palabras Clave – Lazo de Corriente/Tensión, Cero Vivo, Circuito, Simulación, Instrumentación Industrial.

1 Introducción

Este artículo trata de un circuito generador para pruebas de lazos de tensión y/o corriente, cuyo diseño se realizó en la cátedra de Mediciones Electrónicas 2022 del departamento de Ingeniería Electrónica de la UNaM. Los ensayos son en base a simulación y montaje con pruebas de laboratorio en una placa de circuito impreso, donde la recopilación de información se realiza con mediciones y tratamiento de incertidumbre para comprobar su correcto funcionamiento.

1.1 Origen de los lazos de corriente y tensión

En los principios del automatismo industrial, previo al surgimiento de los circuitos electrónicos en la década de 1950, los procesos industriales eran controlados de manera mecánica y el más difundido de estos métodos de control era el control neumático. Inicialmente, en dichas instalaciones, las señales eran manejadas por compresión positiva y negativa de pistones de aire comprimido, las cuales eran transportadas al panel de control por medio de caños.

Luego, se adoptaron los valores de compresión de aire de 3 psi (del inglés libra/pulgada cuadrada) a 15 psi como estándar, observando que el valor que representa a “cero” de presión no es

igual a cero psi, correspondiendo a un “non zero” de 3 psi. A esto se denomina “cero vivo” o “live zero” en inglés. Actualmente en la industria, el control automático de procesos está ligado al empleo de diferentes tipos de señales, como pueden ser: la temperatura, presión, humedad, posición, velocidad, aceleración, conductividad, turbidez, nivel, etc. De todos los tipos de señales analógicas existentes, el estándar dominante en la industria es el de 4-20 mA (4 a 20 partes de mil Amperes) denominado “lazo de corriente” [1].

1.2 Principio de funcionamiento de un lazo de corriente de 4-20mA

Para entender cómo funciona un lazo de corriente continua (CC) de 4-20 mA, necesitamos conocer una ley básica de los circuitos eléctricos, denominada Ley de Ohm, como se establece en (1):

$$V = I * R \quad (1)$$

El lazo de corriente requiere que se aplique un voltaje para producir una corriente, como se ilustra en la Fig. 1, esta lo proporciona la fuente de alimentación “Vs”.

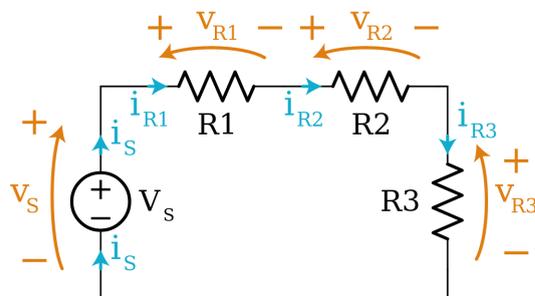


Fig. 1. Circuito eléctrico compuesto por una fuente de CC y tres resistores en serie [2]

La misma corriente circulará a través del lazo, produciendo en cada resistor una caída de voltaje. Usando la (1), se obtiene que la caída de voltaje VR1 a través de R1 es según la (2):

$$V_{R1} = I * R_1 \quad (2)$$

En cada resistor habrá también una caída de voltaje proporcional al valor del resistor en cuestión, pero la corriente que circula por cada elemento será de la misma intensidad, por esta razón, transmitir información por medio de corriente resulta muy confiable. [1] [2]

1.3 Componentes del lazo de corriente

Los lazos de corriente están formados por 5 elementos diferentes, como se aprecia en la Fig. 2:

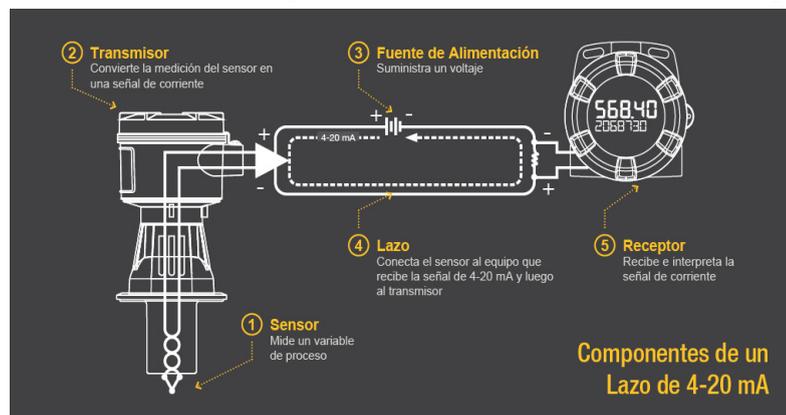


Fig. 2. Componentes presentes en un lazo de corriente industrial [1].

- El Sensor: Es el dispositivo que mide la variable del proceso en cuestión.
- El transmisor: Es el encargado de convertir el valor medido en una señal a un valor proporcional de corriente o tensión.
- La fuente de alimentación: Es la encargada de proporcionar una corriente continua lo más estable posible.
- Lazo de corriente: Es el cable que conecta el sensor al equipo que recibe la señal analógica. Este cable posee una resistencia eléctrica, la cual produce una caída de voltaje según (1), puede ser significativa para distancias mayores a 300 metros.
- El receptor de la señal: El receptor recibe y transforma la señal que llega a él a unidades entendidas fácilmente por los operadores, por ejemplo grados Celsius para temperatura, litros en un sistema de líquido en un tanque, RPM (revoluciones/minutos) para velocidad angular, etc. [1]

1.4 Lazos de tensión

Los lazos de tensión son similares a los lazos de corrientes, pero en vez de la producción de una corriente de 4 a 20 mA se genera una tensión de 0 a 5 V o de 0 a 10 V. Los lazos de tensión son menos utilizados en la industria, ya que estos se ven afectados en mayor medida por la distancia y las caídas resistivas que presentan los cables. Otro problema de los lazos de tensión es que en ambientes ruidosos, como normalmente son los ambientes industriales, pueden ser más fácilmente afectados por interferencias y también por factores térmicos.

2 Materiales y Métodos

Los componentes principales del circuito electrónico del módulo son dos amplificadores operacionales (AO) de uso general. Se colocaron también pulsadores inversores con retención, por medio del cual se selecciona entre lazo de corriente o de tensión y por medio de interruptores tipo DIP Switch se selecciona el nivel de tensión o corrientes que entrega el dispositivo.

Para la realización de este artículo se hicieron los cálculos pertinentes, luego se simuló el circuito por medio del simulador “TINA” de la empresa Texas Instrument en su versión gratuita [3], y por último se realizó el montaje para ensayar en el laboratorio.

2.1 Diagrama de bloques del módulo y funcionamiento

Para comprender de forma más simple cada parte del circuito electrónico, se realizó un diagrama de bloques del mismo, como se ve en la Fig. 3.

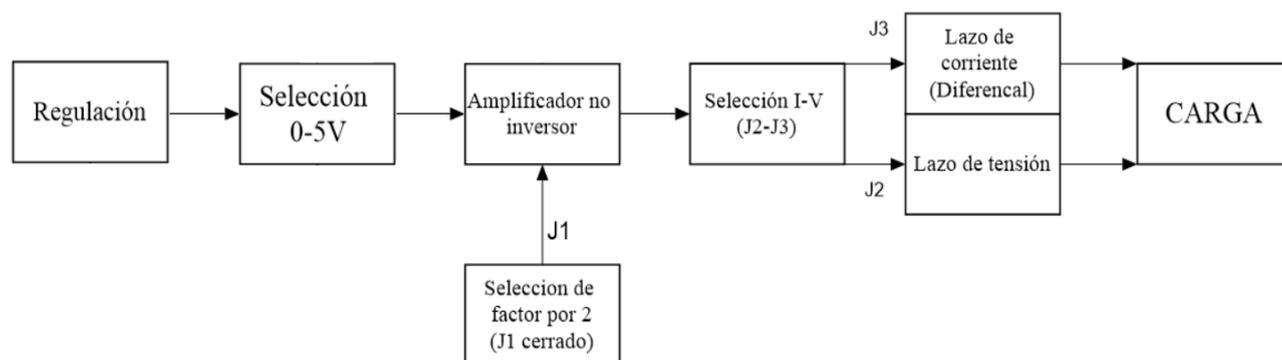


Fig. 3. Diagrama de bloques del módulo multifunción para ensayo de instrumentación industrial

2.2 Regulación a 5 V

El primer bloque que Fig. 3 en el sistema corresponde al circuito de regulación de tensión. Ésta es una referencia conformada por un circuito TL431 [4] y dos resistores de igual valor, produciendo una tensión de estabilizada de salida de 5 V. Tomando los resistores de 10 kΩ, resulta la (3):

$$V_{TL} = 2.5 V * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \rightarrow V_{TL} = 2.5 V * \left(1 + \frac{10 k\Omega}{10 k\Omega}\right) \rightarrow V_{TL} = 5 V \quad (3)$$

Este circuito posee también un resistor limitador de corriente que se utiliza para polarizar el TL431, y fue hallado con el siguiente cálculo de la (4):

$$R_{TL} = \frac{V_{CC} - V_{TL}}{I_{TL}} \rightarrow R_{TL} = \frac{15 V - 5 V}{2 mA} \rightarrow R_{TL} = 5 k\Omega \quad (4)$$

Se adopta el valor comercial para el resistor limitador de 4.7 kΩ, con lo cual, la corriente de polarización será la calculada en la (5):

$$I_{TL} = \frac{V_{CC} - V_{TL}}{R_{TL}} \rightarrow I_{TL} = \frac{15 V - 5 V}{4.7 k\Omega} \rightarrow I_{TL} = 2.13 mA \quad (5)$$

2.3 Circuito del lazo de tensión

El lazo de tensión de 0 a 5 V se obtiene colocando la llave inversora en la posición J2. Con esta configuración el circuito resultante se ve en la Fig. 4:

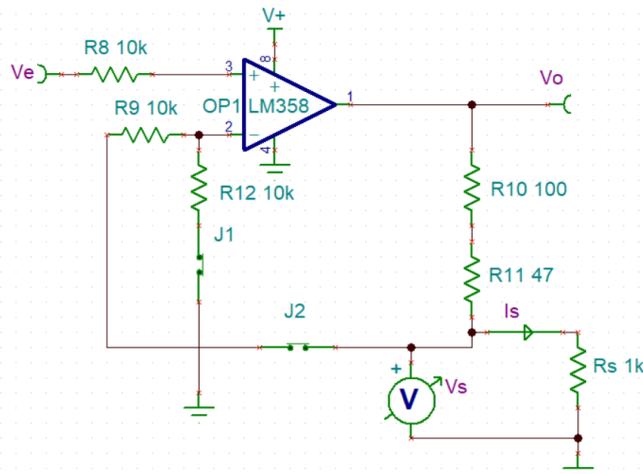


Fig. 4. Circuito generador de lazo de tensión de 0 V a 5 V o de 0 V a 10 V [3]

El Amplificador Operacional OP1 es un amplificador de uso general modelo LM358 [5] y en esta configuración se encuentra funcionando amplificador no inversor simple. Para producir un lazo de tensión de 0 a 10 V, se cierra el interruptor J1, con lo cual se aumenta la ganancia del circuito, haciendo que los posibles valores de salida sean de 0 V, 2 V, 4 V, 6 V, 8 V y 10 V. [6]

2.4 Circuito del lazo de corriente

Para cambiar el modo de operación del lazo de tensión a corriente, se debe cambiar la posición de la llave inversora de J2 a la posición J3, según Fig. 3.

Para el lazo de corriente se necesitan dos amplificadores operacionales, el primer AO funciona como amplificador no inversor simple y el segundo corresponde a la configuración amplificador diferencial. En este modo de trabajo del generador, también es posible agregar por medio del

interruptor J1 un factor que duplica la ganancia del primer AO, obteniendo valores de salida en corriente de 0 mA a 20 mA con saltos progresivos de 4 mA, como puede verse en la Fig. 5. [6]

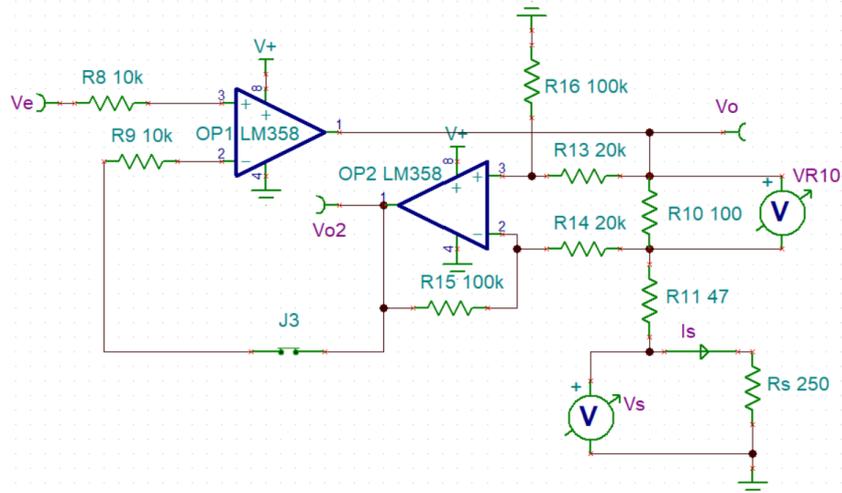


Fig. 5. Circuito generador de lazo de corriente de 0 mA a 10 mA con saltos de 1 mA [3]

2.5 Circuito esquemático completo del módulo

El circuito del módulo completo lo podemos observar en la Fig. 6.

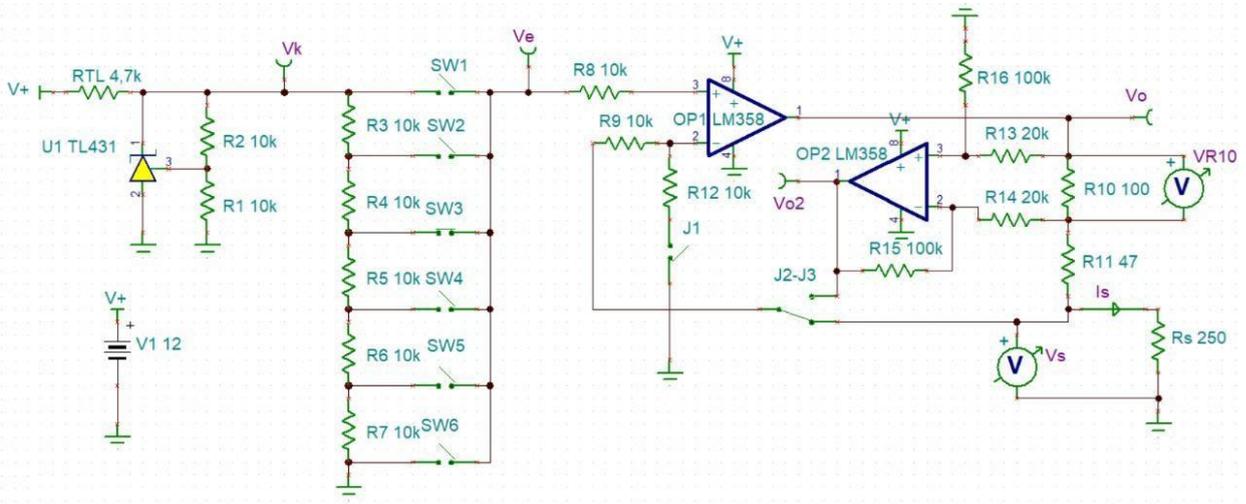


Fig. 6. Circuito electrónico del módulo multifunción para ensayo de instrumentación industrial [3]

2.6 Divisor resistivo para selección de 1 V a 5 V

Se posee también una etapa de selección del valor de tensión de entrada al AO entre 1 V y 5 V con saltos fijos de 1 V, el cual es generado por divisores resistivos, que se seleccionan por medio de DIP switch correspondiente.

En la Fig. 6, se observa que cerrado el interruptor SW1 tendremos en el punto de medición “Ve” el valor de 5 V que provienen del circuito regulador, ya que esta tensión pasa directamente. Si se cierra el interruptor SW2, se obtendrá el siguiente valor de tensión, según la (6):

$$V_e = 5 V \left(\frac{10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} \right) \rightarrow V_e = 5 V \left(\frac{40 \text{ k}\Omega}{50 \text{ k}\Omega} \right) \rightarrow V_e = 4 V \quad (6)$$

Si estuviera cerrado SW3 el valor de la tensión del divisor resistivo resulta de 3 V. Si se cerrará el interruptor SW4 a la salida del divisor resistivo se tendrá 2 V y conectando el interruptor SW5 se obtiene 1 V en el punto Ve.

2.7 Uso del módulo multifunción probador de lazos

La utilización del módulo multifunción es muy simple, primeramente debe conocerse si la señal que desea emular corresponde a un lazo de tensión o un lazo de corriente, y seleccionar ese modo de funcionamiento en el instrumento por medio de la llave inversora en la posición J2 o J3, como ya se vió en la Fig. 3.

Una vez hecha la selección, debe retirar el sensor con el correspondiente transmisor y proceder a conectar el módulo en el lugar de estos equipos. De esta manera, estará inyectando un valor conocido de tensión o corriente y podrá ver qué lectura acusa el instrumento en la sala de mando, descartando así posibles fallas del sensor, del transmisor, cables del lazo o el receptor de la señal.

2.8 Diseño del PCB (del inglés Printed Circuit Board) para el módulo

El diseño del PCB fue realizado en el software libre PCB Wizard [7], el resultado del mismo se aprecia en la Fig. 7.

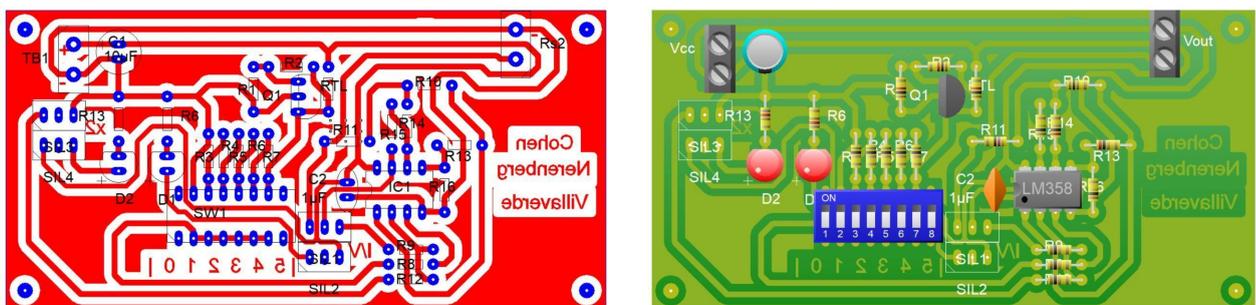


Fig. 7. PCB del circuito realizado en PCB Wizard [7]

2.9 Montaje del módulo multifunción para ensayo de instrumentación industrial

Una vez diagramado el circuito, se realizó el procedimiento de impresión del circuito en una plaqueta virgen de cobre para montar y soldar los componentes electrónicos que conforman el circuito funcional. Se aprecia el diseño y armado final en la Fig. 8.

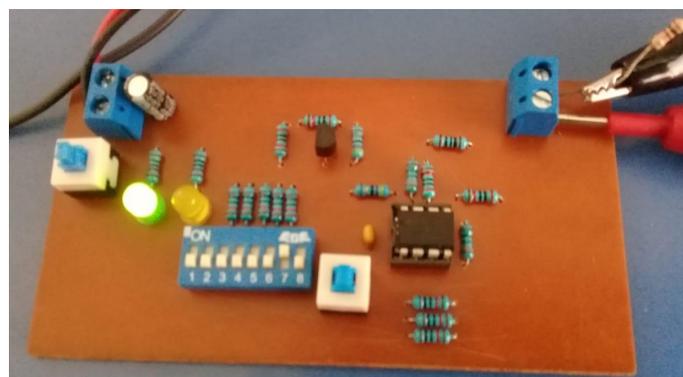


Fig. 8. Circuito del módulo montado en el correspondiente PCB

3 Ensayos de laboratorio realizados al módulo multifunción

El procedimiento de medición fue relevado de tal manera que a lo largo de la mensura se registraron los datos haciendo una variación de voltaje para la configuración de lazo de tensión, y

luego, se realizó el mismo procedimiento de “barrido” pero ahora con la corriente. Se tomaron los datos de los instrumentos de medición, siendo estos un multímetro como voltímetro para medir tensión y amperímetro para medir corriente.

3.1 Ensayo N°1: Variación del lazo de corriente y tensión:

Las mediciones fueron registradas en la Tabla 1 para recopilar la información de los ensayos, con una alimentación del circuito de 12 V.

Tabla 1: Ensayo N°1 - Datos de mediciones

Lazo tensión	0 V a 5 V						
	Teórico	0 V	1 V	2 V	3 V	4 V	5 V
	Simulado [3]	25 mV	999.06 mV	2 V	3 V	3.99 V	4.99 V
	Medido	1.2 mV	0.998 V	2.001 V	3.001 V	4 V	5.099 V
	0 V a 10 V						
	Teórico	0 V	2 V	4 V	6 V	8 V	10 V
	Simulado [3]	33 mV	2 V	4 V	5.99 V	7.99 V	9.81 V
	Medido	2 mV	1,999 V	3,987 V	5,99 V	7,99 V	8,9 V
	Lazo corriente	0 a 10 mA					
Teórico		0 mA	2 mA	4 mA	6 mA	8 mA	10 mA
Simulado [3]		0 mA	2 mA	4 mA	6 mA	8 mA	10 mA
Medido		0 mA	1,95 mA	3,93 mA	5,89 mA	8,12 mA	9,99 mA
0 a 20 mA							
Teórico		0 mA	4 mA	8 mA	12 mA	16 mA	20 mA
Simulado [3]		0 mA	4 mA	8 mA	12.01 mA	16.01 mA	20.01 mA
Medido		0 mA	4,19 mA	8,09 mA	12,2 mA	15,96 mA	19,95 mA

3.2 Estudio estadístico de incertidumbre.

Para dicho estudio se ha empleado un método para hallar incertidumbres, este es denominado “Evaluación de incertidumbres de Tipo B” [8][9], que en resumen se da con especificaciones del fabricante del instrumento de medición.

En primera instancia el multímetro utilizado para la medición fue el UNI-T UT61C [10]. A continuación se muestran en la Tabla 2 y Tabla 3, algunas especificaciones de precisión (Accuracy) según el manual provisto por el fabricante.

Tabla 2: Características de voltaje del multímetro UT61C [10]

UT61C and UT61D

Range	Resolution	Accuracy	Input Impedance	Fixed Value Input
60mV	0.01mV	$\pm(0.8\%+3)$	Around >3000M Ω	1000V dc / 750V ac
600mV	0.1mV	$\pm(0.8\%+3)$		
6V	0.001V	$\pm(0.5\%+1)$	Around 10M Ω	
60V	0.01V			
600V	0.1V			
1000V	1V	$\pm(1.0\%+3)$		

Tabla 3: Características de corriente del multímetro UT61C [10]

UT61C and UT61D

Range	Resolution	Accuracy	Overload Protection
600 μ A	0.1 μ A	(1.0%+3)	Fuse 1: F1A H 240V (CE), Φ 6 x 25mm
6000 μ A	1 μ A		
60mA	0.01mA		
600mA	0.1mA		
6A	0.001A	(1.2%+5)	Fuse 2: F10A H 240V (CE), Φ 6 x 25mm
10A	0.01A		

3.3 Cálculos realizados:

En el Display del dispositivo de medición la mensura observada en el display puede ser de 4 dígitos, el mínimo paso de lectura es de 0,01V, según la tabla 2 el redondeo es del $\pm 0,5\%$ más un dígito; se asume una distribución estadística rectangular por conveniencia [8], entonces la incertidumbre debido a la resolución finita será (7):

$$a = (\pm 0,5\% + 0,01) \Rightarrow u(\delta V) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{(\pm 0,5\% + 0,01)}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

Donde **a** es la ventana de incertidumbre y **u(δV)** es la varianza en función de cómo varía V. Luego se procede a determinar la incertidumbre final U (V) con un factor de confianza k=2 que provee una probabilidad de cobertura del 95,45% [8], siendo este un valor muy fiable; según (8):

$$U(V) = k \cdot u(\delta V) \quad (8)$$

Por ende la expresión final de incertidumbre está dada por la (9)

$$V = \text{Valor medido} \pm U(V) \quad (9)$$

Así, se representa la recopilación de estos cálculos en las Tabla 4, 5, 6 y 7, que lo resume:

Tabla 4: Incertidumbre de 0 a 5 V

a	0,010012	0,01998	0,03001	0,04001	0,05	0,06099
a/√3	0,005780430	0,01153545838	0,01732628158	0,02309978427	0,0288675134	0,0352125929
μ(δV)	0,005773502	0,00577350269	0,00577350269	0,00577350269	0,0057735026	0,0057735026
k.μ	0,012922339	0,02378235761	0,03513023579	0,04655892467	0,0580229839	0,0706614479
V±U(V)	0,0013±0,012	0,998±0,02378	2,001±0,03513	3,001±0,04655	4±0,05802298	5,099±0,07066

Tabla 5: Incertidumbre de 0 a 10 V

a	0,01002	0,02999	0,04987	0,0699	0,0899	0,099
a/√3	0,0057850496	0,0173147345	0,0287924579	0,040356783	0,051903789	0,057157676
μ(δV)	0,0057735026	0,0057735026	0,0057735026	0,005773502	0,005773502	0,005773502
k.μ	0,0129306045	0,035107456	0,0578736197	0,080919795	0,103968007	0,114461056
V±U(V)	0,002±0,0129	1,999±0,0351	3,987±0,0578	5,99±0,08091	7,99±0,10396	8,9±0,114461

De la misma manera se procede para la incertidumbre de las corrientes (I en vez de V):

Tabla 6: Incertidumbre de 0 a 10 mA

a	0,01	0,0295	0,0493	0,0689	0,0912	0,1099
a/√3	0,00577350	0,01703183	0,0284633682	0,039779433	0,0526543445	0,06345079
μ(δI)	0,00577350	0,00577350	0,0057735026	0,005773502	0,0057735026	0,00577350
U(I)	0,01290994	0,03454948	0,0572187614	0,079768080	0,1054668352	0,1270328
I±U(I)	0±0,0129	1,95±0,034	3,93±0,057	5,89±0,07	8,12±0,10	9,99±0,127

Tabla 7: Incertidumbre de 0 a 20 mA

a	0,01	0,0519	0,0909	0,132	0,1696	0,2095
a/√3	0,00577350	0,02996447	0,0524811394	0,076210235	0,0979186056	0,12095488
μ(δI)	0,00577350	0,00577350	0,0057735026	0,005773502	0,0057735026	0,00577350
U(I)	0,01290994	0,06020642	0,1051209462	0,152529778	0,1959222975	0,24197864
I±U(I)	0±0,0129	4,19±0,0602	8,09±0,105	12,2±0,152	15,96±0,195	19,95±0,241

Las últimas filas representan a los valores de voltaje y corriente reales en las Tablas 4 a 7 remarcado en **negrita**, mostrando el rango esperado de la medición.

3.4 Ensayo N°2: Variación en la alimentación

Para el presente ensayo el objetivo es observar la tensión en la salida del circuito si existe algún cambio significativo en cuanto al valor esperado. Donde Vcc representa la tensión suministrada por la fuente de poder, este voltaje tiene un rango de 13V a 11V en los que hay 10 divisiones de por medio. Para este caso se conectó un resistor de 10kΩ (RL) como carga. Se puede observar en la Tabla 8 el resumen de los resultados del ensayo con sus respectivas mediciones para Vo= 5 V, 10 V, 8 V.

Tabla 8: Ensayo N°2 - RL=10 kΩ

Vcc (V)	13	12,8	12,5	12,2	12	11,8	11,6	11,4	11,2	11
Vo = 5 V	5,08	5,061	5,057	5,052	5,049	5,045	5,043	5,04	5,038	5,033
Error	1,6%	1,2%	1,14%	1,04%	0,98%	0,9%	0,86%	0,8%	0,76%	0,66%
Vo = 10 V	10,24	10,22	10,2	10,18	10,11	9,91	9,78	9,61	9,42	9,22
Error	2,4%	2,2%	2%	1,8%	1,1%	-0,9%	-2,2%	-3,9%	-5,8%	-7,8%
Vo = 8 V	8,11	8,13	8,12	8,13	8,14	8,13	8,13	8,14	8,13	8,13
Error	1,1%	1,3%	1,2%	1,3%	1,4%	1,3%	1,3%	1,4%	1,3%	1,3%

3.5 Ensayo N°3: Variación en la carga

Por último se hizo un ensayo similar al ensayo N°1 en donde se utilizaron distintos resistores de cargas “RL” y se tomaron lecturas del amperímetro para el lazo de corriente de 0 a 10 mA y 0 a 20 mA, cuyos resultados se presentan en las Tabla 9, 10, y 11.

Tabla 9: Ensayo N°3 con RL=100 Ω

Lazo de corriente de 0 a 10 mA						
Teórico	0 mA	2 mA	4 mA	6 mA	8 mA	10 mA
Medido	0 mA	1.98 mA	3.99 mA	5.98 mA	7.98 mA	9.93 mA
Lazo de corriente de 0 a 20 mA						
Teórico	0 mA	4 mA	8 mA	12 mA	16 mA	20 mA
Medido	0 mA	3.92 mA	7.86 mA	11.79 mA	15.74 mA	19.69 mA

Tabla 10: Ensayo N°3 con RL=150 Ω

Lazo de corriente de 0 a 10 mA						
Teórico	0 mA	2 mA	4 mA	6 mA	8 mA	10 mA
Medido	0 mA	1.96 mA	3.93 mA	5.95 mA	7.89 mA	9.87 mA
Lazo de corriente de 0 a 20 mA						
Teórico	0 mA	4 mA	8 mA	12 mA	16 mA	20 mA
Medido	0 mA	3.94 mA	7.9 mA	11.8 mA	15.8 mA	19.80 mA

Tabla 11: Ensayo N°3 con RL=220 Ω

Lazo de corriente de 0 a 10 mA						
Teórico	0 mA	2 mA	4 mA	6 mA	8 mA	10 mA
Medido	0 mA	1.95 mA	3.91 mA	5.88 mA	7.86 mA	9.85 mA
Lazo de corriente de 0 a 20 mA						
Teórico	0 mA	4 mA	8 mA	12 mA	16 mA	20 mA
Medido	0 mA	3.93 mA	7.88 mA	11.82 mA	15.79 mA	19.77 mA

4 Conclusiones

En este proyecto, se concluye que fueron exitosos tanto el diseño, como la simulación y el montaje del circuito del “Módulo Multifunción Generador de Lazo de Corriente o Tensión para Ensayo de Instrumentación Industrial Analógica”, dado que hay acuerdo entre lo calculado, simulado y lo medido. Con respecto a los ensayos, en el **ensayo n°1** se puede destacar la precisión significativa del circuito en ambas configuraciones, con un grado de incertidumbre pequeño, así los valores medidos están en un rango de valor teórico, esto da lugar a que se puede *fabricar* un lazo efectivo con los *dispositivos utilizados* en este proyecto.

En el **ensayo n°2**, al usar la tensión de alimentación de 12V, la variación de la salida tiene el menor error, por lo que se *recomienda utilizar* esta tensión como valor nominal de alimentación.

Por último, a lo que compete al **ensayo n°3** para los valores de resistores de carga ensayados: 100Ω, 150Ω, 220Ω; la corriente en el lazo se mantiene en un orden de concordancia e incertidumbre esperado de acuerdo a los respectivos valores teóricos calculados.

5 Referencias

- [1] S. Paonessa, B. McDuffee, “Los Fundamentos de los Lazos de Corriente de 4-20 mA,” Precision Digital Corporation. 2022. [Online].(Acceso: 16/07/2022) Disponible: <https://www.predig.com/whitepaper/de-regreso-lo-b%C3%A1sico-los-fundamentos-de-los-lazos-de-corriente-de-4-20-ma>,
- [2] W. McAllister, “Resistores en serie,” Khan Academy, 2016 [Online]. (Acceso 17/07/2022) Disponible: <https://es.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic/ee-resistor-circuits/v/ee-series-resistors>
- [3] Software TINA (Versión 9.3) (2014) Texas Instrument. <https://www.ti.com/tool/TINA-TI> (Acceso 07/07/2022)
- [4] TL431 Precisión Programmable Reference. Texas Instrument. Dallas, Texas, Estados Unidos (2015) Disponible: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1083117/TI1/TL431.html>
- [5] LM358 Dual Operational Amplifiers. Texas Instrument. Dallas, Texas, Estados Unidos (2010) Disponible: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/551691/TI/LM358.html>
- [6] H.R. Anocibar, J. A. Olsson, “Conversión de Tensión a Corriente - Ohmetro” Facultad de Ingeniería, UNaM, Departamento de Ingeniería Electrónica, Cátedra: Mediciones Electrónicas 2022. (Acceso 29/07/22) Disponible: https://aulavirtual.fio.unam.edu.ar/pluginfile.php/284196/mod_resource/content/1/CircConverTensCorr.pdf
- [7] Software PCBWizard (Versión 3.5) (2015) Wizard. <https://pcb-wizard.com> (Acceso 21/07/2022)
- [8] H.R. Anocibar, J. A. Olsson, “Incertidumbre en las Mediciones” Facultad de Ingeniería, UNaM, Departamento de Ingeniería Electrónica, Cátedra: Mediciones Electrónicas 2022. (Acceso 29/07/22) Disponible: https://aulavirtual.fio.unam.edu.ar/pluginfile.php/199438/mod_resource/content/1/IncertiIntro.pdf
- [9] H.R. Anocibar, J. A. Olsson, “Mediciones de Corrientes con Shunt” Facultad de Ingeniería, UNaM, Departamento de Ingeniería Electrónica, Cátedra: Mediciones Electrónicas 2022. (Acceso 29/07/22) Disponible: https://aulavirtual.fio.unam.edu.ar/pluginfile.php/227658/mod_resource/content/1/MedCteShunt.pdf
- [10] Operating Manual: Model UT61A/61B/61C/61D/61E. Uni-Trend Group Limited. Guang Dong, China. 2008