

Balanza de precisión

Trabajo Práctico de Laboratorio 5

Integrantes: Clemenz, Jeremías Ezequiel
Gallardo, Nicolás
Recalde, Santiago
Villar, Federico Ignacio

Profesores: Ferreyra, Pablo
Reale, César

Fecha de entrega: 15 de diciembre de 2023
Córdoba, Argentina

Resumen

En el siguiente informe se diseñará la parte analógica de una balanza de plato comercial para que luego la señal pase por un ADC. La idea es que esta balanza pese hasta 2kg, con una precisión de 1g, bajo un rango de temperaturas de 0 a 40°C. Para cumplir con el objetivo planteado, se utilizará una celda de carga con las características de los componentes y, al final, se hará una tabla de costos.

El proyecto tiene diferentes etapas. Se analiza primero la alimentación de la ganga extensiométrica, análisis de la misma galga, etapa de acondicionamiento de la señal analógica y finalmente presentación de los datos interpretados que se muestran al usuario.

Índice de Contenidos

1. Desarrollo	1
1.1. Elección de la galga extensiométrica	1
1.1.1. Primera opción	1
1.1.2. Segunda opción	2
1.1.3. Selección de la celda	3
1.2. Elección de la etapa amplificadora	3
1.3. Determinación de los errores	4
1.4. Errores de la celda de carga TAL220	5
1.5. Alimentación: diseño y error inducido	7
1.6. Combinación de los errores	8
1.7. Especificaciones de la balanza diseñada	8
1.8. Costos finales	9
2. Conclusiones	10

Índice de Figuras

1. Celda de carga de ejemplo	1
2. Configuración a implementar (puente y fuente de corriente)	1
3. Amplificador de instrumentación	3
4. Principio de recalibración	5
5. Aproximación por dos rectas	6
6. Circuito de alimentación de la celda de carga	7

Índice de Tablas

1. Error total y costo de varios amplificadores operacionales considerados (fuente TP 2022)	5
2. Resumen de los errores	8
3. Especificaciones de la balanza diseñada	8
4. Costos finales de los componentes	9

1. Desarrollo

1.1. Elección de la galga extensiométrica



Figura 1: Celda de carga de ejemplo

La galga será alimentada por una fuente de corriente y esta a su vez tendrá como referencia una fuente de tensión continua de un valor convenientemente determinado.

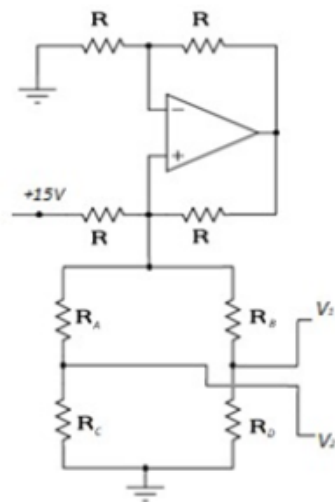


Figura 2: Configuración a implementar (puente y fuente de corriente)

1.1.1. Primera opción

La primera opción consiste en el modelo SKU114990093. Este modelo tiene resolución de un gramo. Una desventaja que poseen es la falta de información sobre la no linealidad en los

errores de la medición. Se estudian algunas otras opciones entonces.

1. **Rated output (mV/V):** 2
2. **Excitation voltage (V):** 15
3. **Combined error (%FS):** 0.03
4. **Alimentación (V):** 15
5. **Carga máxima (g):** 3000
6. **Apreciación (mV/V):** 2
7. **Error absoluto máximo:** 0.009
8. **Salida para un gramo (mV):** 0.01
9. **Error para un gramo (%):** 90
10. **Error para 100 gramos (%):** 0.9

1.1.2. Segunda opción

Otro modelo que se tiene como opción es el modelo TAL220, que tiene un precio menor al mostrado en la sección anterior, la desventaja que tiene es que no tiene resolución que permita apreciar un gramo. Una ventaja es la información sobre el dato de los errores de no linealidad.

1. **Rated output (mV/V):** 1
2. **Excitation voltage (V):** 10
3. **Combined error (%FS):** 0.05
4. **Non-linearity (%FS):** 0.05
5. **Alimentación (V):** 10
6. **Carga máxima (g):** 3000
7. **Apreciación (mV/V):** 1
8. **FS (mV):** 10
9. **Apreciación mínima (mV/g):** 0.00333
10. **Error absoluto máximo (mV):** 0.005
11. **Salida para un gramo (mV):** 0.00333

12. **Error para un gramo (%)**: 150

13. **Error para 100 gramos (%)**: 1.5

Se aprecia que el error para un gramo es mayor al 100 %, pero es posible mediante técnicas analógicas disminuir el error.

1.1.3. Selección de la celda

De acuerdo con lo visto anteriormente, se puede verificar que la opción que es más viable para los conocimientos adquiridos, así como las especificaciones brindadas, el modelo apto es TAL220.

1.2. Elección de la etapa amplificadora

La etapa de alimentación se implementa con una configuración de amplificador de instrumentación, la misma se encarga de minimizar los errores. Los amplificadores que se tienen como referencia, son del modelo OPA4197IDR.

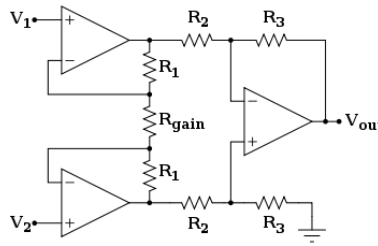


Figura 3: Amplificador de instrumentación

Para poder encontrar la expresión que relaciona la tensión de salida con ambas entradas, se separa el circuito en 2 etapas. La primera se acopla a la segunda mediante una configuración diferencial.

Por diseño se puede plantear que $R_2 = R_3$, de forma que quedan las siguientes ecuaciones:

$$V_a - V_b = V_1 + I R_1 - (V_2 - I R_1) = (V_1 - V_2) + I 2R_1$$

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R_{gain}}$$

$$V_a - V_b = (V_1 - V_2) \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_{gain}}\right)$$

Se puede entonces obtener:

$$V_O = (V_a - V_b) \left(-\frac{R_3}{R_2}\right) = (V_1 - V_2) \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_{gain}}\right) (-1)$$

De esta forma, el circuito de instrumentación tiene una ganancia de lazo de 100. Esto se logró porque la celda utilizada tiene un **Rate output** de 1mV/V. El valor de la ganancia se determina para la salida que se tiene a máxima carga (10 mV), y se busca llevar eso a 1 V, de modo de permitir una entrada razonable para que sea analizada por un microcontrolador.

Con esta ganancia determinada se procede a seleccionar R_1 y R_{gain} . Se decide fijar $R_1 = 10\text{ k}\Omega$, se tiene entonces así:

$$(2 \frac{10}{R_{gain}} + 1) = 100 \Rightarrow R_{gain} = 202\ \Omega$$

1.3. Determinación de los errores

Para determinar el error debido a la tensión de offset en el primer amplificador, se tiene la siguiente expresión, con el siguiente resultado:

$$\Delta V_O V_{OS} = V_{OS} (1 + 2 \frac{R_1}{R_{gain}}) = 2.5\text{ mV}$$

Por corrientes de polarización en el primer amplificador, se tiene:

$$\Delta V_O I_{OS} = 2 R_1 I_{OS} = 40\ \mu V$$

Por ganancia diferencial finita en la primera etapa:

$$\Delta V_O Ad < \infty = FS \left| \frac{1}{T} \right| = 30\ \mu V$$

Por RRMC menor a infinito se obtiene para la primer parte:

$$\Delta V_O RRMC \neq \infty = \frac{FS}{RRMC} = 3\ \mu V$$

Para determinar el error debido a la tensión de offset en el segundo amplificador, se tiene la siguiente expresión, con el siguiente resultado:

$$\Delta V_O V_{OS} = V_{OS} (1 + 2 \frac{R_3}{R_2}) = 50\ \mu V$$

Por corrientes de polarización en el segundo amplificador, se tiene:

$$\Delta V_O I_{OS} = R_2 I_{OS} = 4.4\ \mu V$$

Por ganancia diferencial finita en la segunda etapa:

$$\Delta V_O Ad < \infty = FS \left| \frac{1}{T} \right| = 0.6\ \mu V$$

Para determinar el error total en el segundo amplificador, se llega al valor de:

$$\Delta V_{OT} = 2.59\text{ mV}$$

Puede apreciarse claramente cómo ese error imposibilita la medición con resolución de un gramo. Como alternativa, es posible utilizar otros amplificadores, es así que se toma como referencia a la siguiente tabla ilustrativa.

Tabla 1: Error total y costo de varios amplificadores operacionales considerados (fuente TP 2022)

Amplificador Operacional	Error Total (mV)	Costo Beneficio (error/costo)
LM324	207	0.51833
OPA7419	2.63	0.0017
OP07C	9.22	0.0032
MC33272	3.17	0.0093
OP177F	1.71	0.0013
OP747	3.19	0.0007

Se llega a la conclusión de que el amplificador que tiene una mejor relación costo beneficio es el OP747. Sin embargo, el OP177 tiene una relación costo beneficio aceptable, además que el error no depende tanto de la temperatura ($0.1\mu V/^{\circ}C$).

1.4. Errores de la celda de carga TAL220

El error provocado por la celda es de 0.05 % del fondo de escala, es decir, 0.5 mV . Aparece también un error de $0.005\text{ \%}/^{\circ}C$ que deriva en un error de $50\mu V/^{\circ}C$ con la amplificación requerida de 100 anteriormente mencionada.

El error por no-linealidad es 0.05 \%FS , con un FS de 10 mV el error máximo será $5\mu V$, error inaceptable si se espera resolver el gramo el cual tendrá una salida de $3,33\mu V$. Para reducir dicho error se opta por un proceso de calibración.

En cuanto al proceso mencionado, se plantean las siguientes 2 figuras:

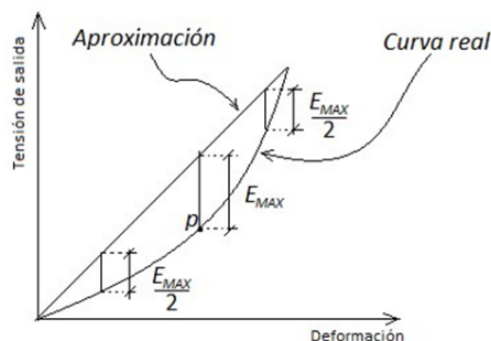


Figura 4: Principio de recalibración

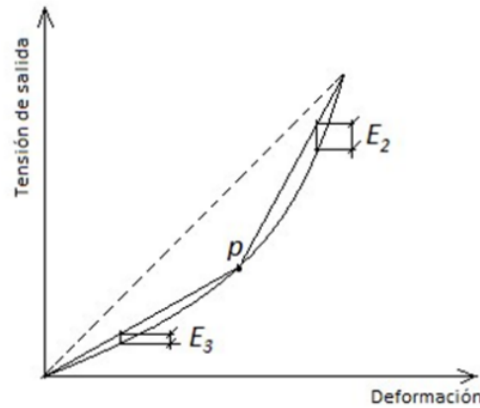


Figura 5: Aproximación por dos rectas

Suponiendo que en el punto P está el máximo error por no linealidad, a ambos lados de ese punto se tiene $\frac{E_{max}}{2}$. Con la aproximación mediante dos segmentos es que se obtiene lo de la última figura adjunta hasta el momento. Se tiene entonces, de esa forma, que el error en el punto P es:

$$E_{max} - E_{max} \text{ } 100 \% = 0$$

Y los errores para V_2 y V_3 son:

$$E_2 = \frac{E_{max}}{2} - \frac{E_{max}}{2} X \%$$

$$E_3 = \frac{E_{max}}{2} - \frac{E_{max}}{2} Y \%$$

Aún sin conocer los valores de X e Y, se visualiza que el error en esos últimos 2 puntos es menor a la mitad del máximo, por ende, cómo límite se puede tomar (con $E_{max} = 5\mu V$):

$$E'_{max} = 2.5\mu V$$

Si se agrega un par de puntos de calibración, se puede reducir el error aún más. Se puede entonces tomar como límite:

$$E''_{max} = 2.5\mu V$$

Error que entra dentro de los parámetros de diseño. En cuanto al análisis de costo del modelo, se plantea. El proceso de calibrado puede ser desempeñado por un personal poco calificado, debido a que puede tratarse de acciones simples si previamente el programador del microcontrolador incluye una rutina de auto-calibrado solicitado por especificaciones, la cual necesitará que el operario calibrando introduzca una secuencia de teclas y proceda a cargar la balanza con un peso conocido, la rutina debería mostrar en el display la finalización del calibrado y el operario procederá con la siguiente unidad.

Suponiendo que el operario tenga una ganancia en bruto de \$245.7 mensuales, trabajando 21 días mensuales, 30 hs semanales. Para una producción de 1000 unidades mensuales, el operario necesitará realizar una calibración cada 7.2 minutos, debido a la simplicidad de la maniobra este tiempo se considera más que suficiente. Con todas estas condiciones se llega a que el costo de calibración por unidad sea de \$0.234. Si se utiliza la celda SKU 114990093 con unas prestaciones un poco mejor pero con un costo en torno a los \$10, la celda TAL220 puede mejorar el error si a su costo de en torno a los \$8 se le suma el costo de calibración mejorando así la propuesta.

Deriva térmica: Para la aplicación, el rango de operación será 0°C y 40°C y los datos de las hojas de datos fueron a partir de la temperatura de 25°C . Así que para 0°C hay un error de 1.27 mV y para 40°C 0.75 mV .

Al final, viendo todos esos datos, se optó por utilizar la celda TAL 220.

1.5. Alimentación: diseño y error inducido

Se usa el siguiente circuito para alimentar a la celda.

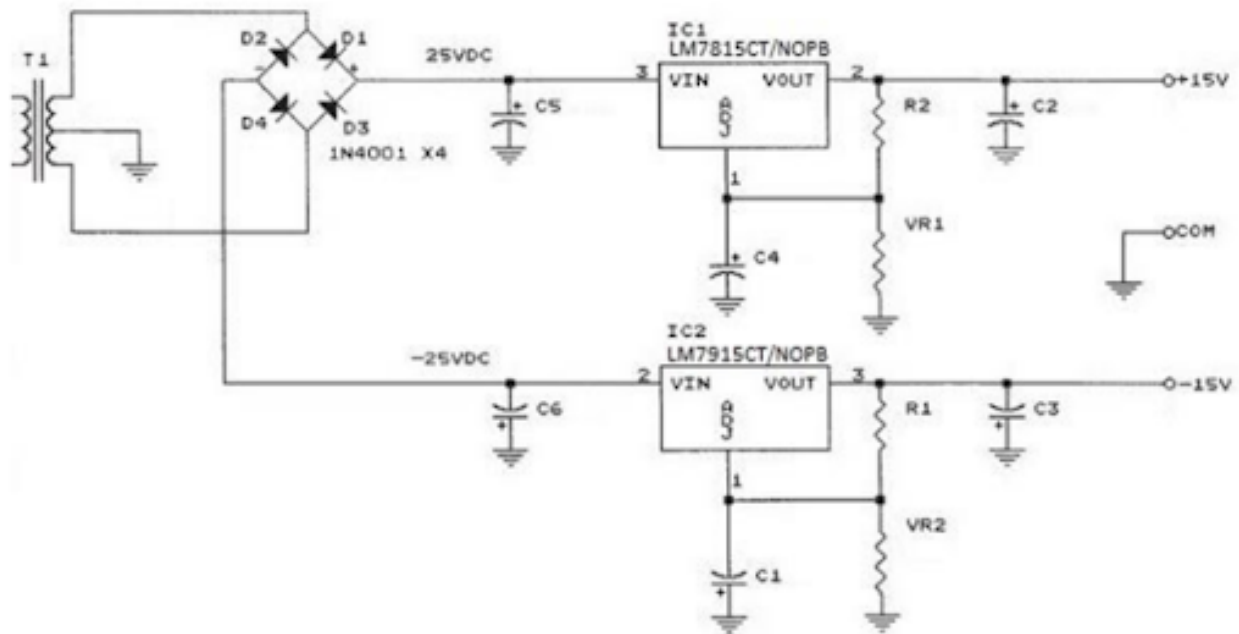


Figura 6: Circuito de alimentación de la celda de carga

Lo más relevante sobre la etapa de alimentación es el error de la misma. Esta etapa será la referencia de una fuente de corriente que a su vez alimentará la galga. Según la hoja de datos del LM7815CT/NOPB la tensión de salida será $+15\text{ V}$ con un $\Delta V = 4\text{ mV}$, esto se traduce como $2.67\mu\text{V}$ de salida en la galga. Finalmente, el error a la salida del amplificador producto de la fuente será 0.267 mV .

1.6. Combinación de los errores

Los errores que más pesan en el circuito final son los que agrega la primera etapa (1.5 mV). Por derivas térmicas es posible apreciar oscilaciones entre 1.27 y 0.75 mV . Entonces, al sumar los errores debido a la temperatura se obtiene $60.1\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. La celda agrega un error de no linealidad menor a $1.25\mu\text{V}$, como se mencionó anteriormente

Los errores de offset serán los más fáciles de tratar utilizando el microcontrolador ya que son fijos durante toda la operación de la balanza. Se adoptó la última alternativa pues es más viable económicamente y con ella solo se tendrá que llevar en consideración solamente los errores debidos a la celda de carga su no linealidad, además de la deriva térmica. Este último error también puede ser compensado alertando al usuario cuando hay peso muerto por un determinado tiempo.

Tabla 2: Resumen de los errores

Error	Valor
Errores presentados por la celda de carga (continua)	0.5 mV
Errores presentados por la celda de carga (no-linealidad)	$< 1.25\mu\text{V}$
Errores del circuito de amplificación (continua)	1.57 mV
Errores de la fuente (continua)	0.27 mV
Errores totales debido a la deriva térmica	$60.1\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
Error total (continua)	2.34 mV
Error total (no-linealidad)	$1.25 \times 10^{-3}\text{ mV}$

1.7. Especificaciones de la balanza diseñada

Tabla 3: Especificaciones de la balanza diseñada

Specification	Value
Alimentación	220 Vca
Temperatura de funcionamiento	0°C hasta 40°C
Rango de pesaje	2Kg
Rango de pesaje	1 g a 2000 g
Apreciación	1g
Celda de carga	1mV/V , 1000Ω
Máximo error de linealidad	$0,045\%$ F.S
Máximo error por deriva térmica	$0,06\%$ F.S.

1.8. Costos finales

Tabla 4: Costos finales de los componentes

Componente	Código en la página web	Cantidad por unidad producida	Costo unitario (USD)	Costo por unidad producida (USD)
Resistors 1 %	S82KCATR-ND	19	0.00590	0.11210
Load cell TAL 220	1568-1852-ND	1	8.50000	8.5000
OP177FSZ	OP177GSZ-REEL7TR-ND	4	1.23200	1.23200
Power transformers	FP34-75-B-ND	1	6.72656	6.72656
Diodo 1N4001-TP	1N4001-TPMSCT-ND	4	0.01620	0.0648
LM7815CT/NOPB	296-44418-5-ND	1	0.70340	0.6650
LM7915CT/NOPB	LM7915CT/NOPB-1ND	1	0.66500	0.11600
Capacitor 10uF	P19588TB-ND	4	0.02900	0.37900
Capacitor 2200uF	228CKE016MLU-ND	2	0.18950	3.60000
PIC18F4550-I/P	PIC18F26J53-I/SS-ND	1	3.60000	1.1439
LED Display 7-Segment	TDCG1060M6ND	1	1.14390	3.95000
SWITCH KEY-PAD 12 KEY NON-ILLUM	1528-1136-ND	1	3.95000	3.95000
Calibración	-	-	-	0.234
Total para una balanza producida				26.07

2. Conclusiones

Se buscó cumplir con todas las especificaciones requeridas, esto se realizó aplicando los conocimientos técnicos adquiridos, con la premisa de alcanzar una solución que combine eficiencia y competitividad comercial, procurando mantener los costos en niveles óptimos.

A lo largo de la ejecución de este proyecto, se ha logrado adquirir experiencia en el diseño de circuitos. Un ejemplo destacado en esto se evidenció en las etapas iniciales del diseño, donde la elección del amplificador OPA4197IDR, debido a su menor costo, no obstante, reveló limitaciones que resultaron incompatibles con algunas exigencias particulares, presentando un margen de error sustancial en la tensión de offset. Como respuesta a este hallazgo, se procedió a sustituir dicho componente por el OP177FSZ, acompañado de un análisis exhaustivo de otras alternativas amplificadoras disponibles en el mercado.

El resultado final de la balanza desarrollada refleja una conformidad adecuada con el valor proyectado para el proyecto, y su desempeño se ajusta de manera satisfactoria a las especificaciones establecidas.