

TRABAJO DE LABORATORIO N°3

ÍNDICE

Introducción	2
I. Desarrollo	2
I.1. Elección de la galga extensiométrica	2
Opción 1	2
Opción 2	3
I.2. Elección de la etapa amplificadora	4
II. Determinación de los Errores	5
II.1 Errores de la primer etapa del amplificador	5
• Error debido al desajuste de tensión de Offset	5
• Error debido a corriente de polarización	6
• Error debido a ganancia diferencial finita	6
• Error debido CMRR no infinito	6
II.2 Errores de la segunda etapa del amplificador	6
• Error debido al desajuste de tensión de Offset	6
• Error debido al desajuste de tensión de Offset	7
• Error debido a la Ganancia Diferencial Finita	7
II.3 Error total del amplificador y cómo reducirlo	7
II.4 Errores de la celda de carga (TAL220)	8
III. Alimentación : diseño y error inducido	11
IV. Combinación de todos los errores	11
V. Especificaciones de la Balanza diseñada	12
VI. Recomendaciones para el programador del microcontrolador	13
VI.1 Display	13
VI.2 Peso muerto (Tara) y compensación de errores automática por software	13
VI.3 Puesta a cero manual	13
VI.4 Aviso de sobrecarga y de Peso límite excedido	13
VII. Costos de la Balanza	13
Conclusión	16

Introducción

El objetivo de este trabajo es diseñar la parte analógica de una balanza de plato comercial para posteriormente procesar la señal en un conversor analógico digital que muestre el resultado adecuado. La balanza pesará hasta 2kg con una precisión de 1g, trabajando en las temperaturas de 0°C hasta 40°C. Para realizarla, se utilizará una celdas de carga con las características adecuadas, especificando todas las características de los componentes y, al final, haremos una tabla de costos. Las especificaciones técnicas se encuentran en la Tabla de la Figura 1. También, el desarrollo deberá ser comercialmente competitivo.

Pesaje máximo (g)	Pesaje mínimo (g)	Apreciación (g)	Rango de temperatura de trabajo (°)
2000	1	1	[0;40]

Figura 1 : Especificaciones técnicas

El proyecto será realizado en diferentes etapas. Se desarrollará la etapa de alimentación de la galga extensiométrica, análisis de la misma galga, etapa de acondicionamiento de la señal analógica y finalmente la presentación de los datos interpretados que se mostraran al usuario (etapa digital).

I. Desarrollo

I.1. Elección de la galga extensiométrica

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. La configuración es la representada en la Figura 2.

Opción 1

Como primera opción se consideró la celda modelo SKU114990093. Este modelo tiene un precio que puede ser considerado dentro del presupuesto y con la misma es posible resolver al gramo. En la tabla de la Figura 3 se muestran los parámetros más relevantes para el proyecto.

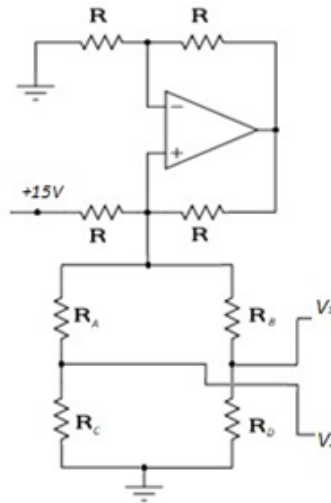


Figura 2 - Configuración del transductor

rated output (mV/V)	2
excitation voltage (V)	15
combined error (%FS)	0.03
alimentación (V)	15
carga máxima (g)	3000
apreciación (mV/V)	2
error absoluto máximo	0.009
salida para un gramo (mV)	0.01
error para un gramo (%)	90
error para 100 gramos (%)	0.9

Figura 3 : características de la celda SKU 114990093

En un principio esta podría ser una buena opción pero se encontró que el dato de los errores de no linealidad no se encontraba en la hoja de datos. Debido a esto se estudiaron otras opciones disponibles en el mercado.

Opción 2

Se procedió a estudiar la celda de carga modelo TAL220, el cual posee un precio menor a la mencionada anteriormente, pero al realizarse el análisis de error se encontró que no era posible apreciar el gramo, no obstante en la hoja de datos se contaba con el dato de los errores de no-linealidad. Con esta información es posible determinar un método para reducir los errores de manera tal que sea viable la utilización de la celda.

rated output (mV/V)	1
excitation voltage (V)	10
combined error (%FS)	0.05
non-linearity (%FS)	0.05
alimentación (V)	10
carga máxima (g)	3000
apreciación (mV/V)	1
FS (mV)	10
apreciación mínima (mV/g)	0.00333
error absoluto máximo (mV)	0.005
salida para un gramo (mV)	0.00333
error para un gramo (%)	150
error para 100 gramos (%)	1.5

Figura 4 : características de la celda TAL 220

En un principio el error para el gramo es mucho más que el 100%, pero con una adecuada técnica es posible disminuirlo. Por tanto se consideró utilizar el modelo TAL220.

I.2. Elección de la etapa amplificadora

La etapa de amplificación inicialmente fue implementada con la configuración llamada amplificador de instrumentación (ver Figura 5) que tiene un uso común para equipamientos que trabajan con señales muy débiles, minimizando los errores. Los amplificadores 1, 2 y 3 son del modelo OPA4197IDR.

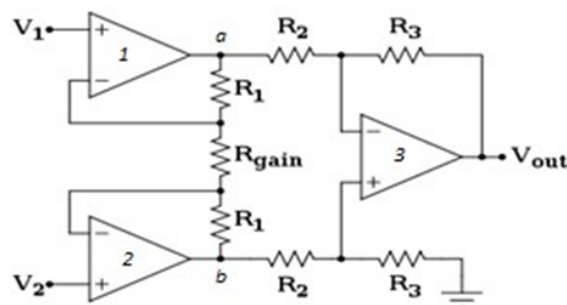


Figura 5 : Esquema del amplificador de instrumentación

Para encontrar la salida V_{out} en función de las dos entradas, separamos el circuito en dos etapas. La primera parte se liga a segunda parte con una configuración diferencial utilizándose la elección de diseño de $R_3 = R_2$. Para encontrar la relación V_{out} en función de las entradas V_1 _ V_2 de la figura 1, utilizamos las ecuaciones siguientes:

$$V_a - V_b = V_1 + IR_1 - (V_2 - IR_1) = (V_1 - V_2) + I2R_1$$

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

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

El análisis de la siguiente etapa:

$$V_{out} = (V_a - V_b) \left(- \frac{R_3}{R_2} \right)$$

Haciendo $R_2 = R_3$

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

Por diseño se decidió que el circuito de instrumentación tendrá una ganancia de lazo de 100 V/V. Esto es debido a la celda utilizada que tiene un Rate Output de 1 mV/V que para una alimentación de 10 V tiene una salida de 10 mV a máxima carga y para obtener una entrada cerca de 1 V en un microcontrolador se determinó este valor de ganancia.

Con esta ganancia determinada se procede a seleccionar R_1 y R_{gain} . Fijando $R_1 = 10k\Omega$, se tendrá que:

$$\left(2 \frac{10}{R_{gain}} + 1 \right) = 100$$

Resolviendo la ecuación, $R_{gain} = 202 \Omega$.

II. Determinación de los Errores

II.1 Errores de la primer etapa del amplificador

• Error debido al desajuste de tensión de Offset

Para analizar este error basta poner una fuente en la pata positiva, por eso reemplazamos las tensiones de entrada por V_{OS} .

Luego, el error puede ser escrito como:

$$\Delta V_o = V_{OS} \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_{gain}} \right)$$

Se encontró el valor de 2,5 mV.

• Error debido a corriente de polarización

Para calcular el error debido a las corrientes de polarización, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\Delta V_o = 2R_1 I_{OS}$$

Se encontró el valor de 40 uV.

• Error debido a ganancia diferencial finita

Para calcular el error debido a la ganancia diferencia no infinita, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\Delta V_o = FS \cdot \left| \frac{1}{T} \right|$$

Se encontró el valor de 30 uV.

• Error debido CMRR no infinito

Para calcular el error debido al CMRR no infinito, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\Delta V_o = \frac{FS}{RRMC}$$

Se encontró el valor de 3 uV.

II.2 Errores de la segunda etapa del amplificador

• Error debido al desajuste de tensión de Offset

Utilizamos el mismo procedimiento que el error de la primera etapa

$$\Delta V_o = V_{OS} \left(1 + \frac{R_3}{R_2} \right) = 2 \cdot V_{OS}$$

Se encontró el valor de 50 uV

• Error debido al desajuste de tensión de Offset

Utilizando del dato de que el error por corriente de polarización en la configuración diferencial es dado por la resistencia de realimentación tenemos que:

$$\Delta V_o = I_{OS} R_2$$

Se encontró el valor de 4,4 uV

• Error debido a la Ganancia Diferencial Finita

Utilizando:

$$\Delta V_o = \frac{FS}{T}$$

Se encontró el valor de 0,6 uV.

II.3 Error total del amplificador y cómo reducirlo

Para determinar el error total de este amplificador hay que sumar todos los errores encontrados. Encontramos como resultado un error total de 2,59 mV. Este error sobrepasa el tolerado para conseguir resolución en torno del gramo.

La primera alternativa considerada fue mejorar estos errores con la elección de un modelo de amplificador más adecuado o con un amplificador de instrumentación ya listo como el OP177F. También se consideró otras opciones como los amplificadores operacionales indicados abajo:

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

Figura 6: Error total y costo de varios amplificadores operacionales considerados

A través de una tabla Excel fue posible hacer una comparación y llegar a la conclusión de que el OP747 tenía el mejor costo beneficio. Pero también el OP177 no es una mala opción por tener un buen costo beneficio y un error muy bajo de deriva térmica.

Etapa 1	VOS (mV)	1.5
	IOS (mV)	0.01
	CMRR (mV)	0.0001
	Ad no infinita (mV)	0.0562
Etapa 2	VOS (mV)	0.03
	IOS (mV)	0.0011
	Ad no infinita (mV)	0.00112
Error total		1.6

Figure 7: Errores de las dos etapas del amplificador y error total

Se tomó la decisión de utilizar el modelo CI OP177 cuyos errores totales de ambas etapas es aceptable y, también, de la hoja de datos del OP177FSZ se tiene un error por temperatura de $0,1 \text{ uV}/^{\circ}\text{C}$ y aplicando este error en las dos partes del circuito observamos que va a tener un error de $10,1 \text{ uV}/^{\circ}\text{C}$.

II.4 Errores de la celda de carga (TAL220)

El error combinado provocado por la celda es $0,05\% \text{FS}$ y multiplicando este valor por la máxima salida de la celda y por la ganancia adquirida en el circuito será $0,5 \text{ mV}$.

La celda presenta un error combinado de $0,005\%/^{\circ}\text{C}$ que va implicar en un error en un error de $50 \text{ uV}/^{\circ}\text{C}$ con la amplificación de $100\text{V}/\text{V}$ ya considerada.

El error por no-linealidad es $0,05\% \text{FS}$, con un FS de 10mV el error máximo será 5uV , error inaceptable si se espera resolver el gramo el cual tendrá una salida de $3,33 \text{ uV}$. Para reducir dicho error se opta por un proceso de calibración. El razonamiento es el siguiente (ver Figuras 8 y 9):

Suponiendo en el punto P se encuentra el máximo error E_{max} por no-linealidad a ambos lados de dicho punto se tendrá $\frac{E_{\text{max}}}{2}$. Si se realiza una segunda aproximación calibrando con un peso conocido en torno al punto P dando como resultado dos segmentos de recta se tendrá la Figura 9.

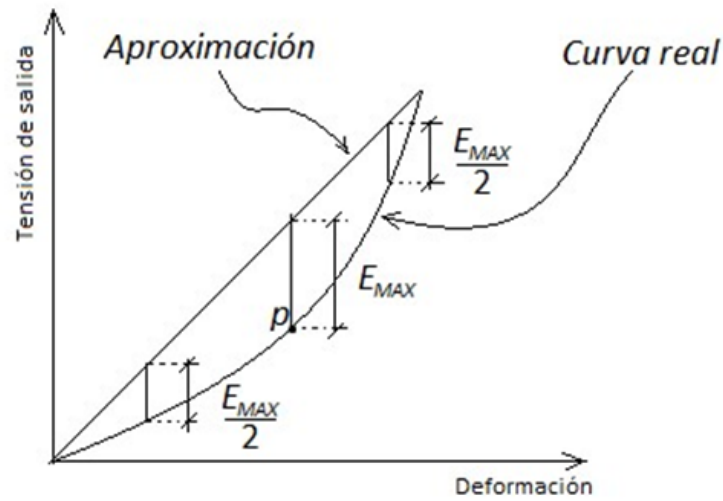


Figura 8 : Principio de recalibración

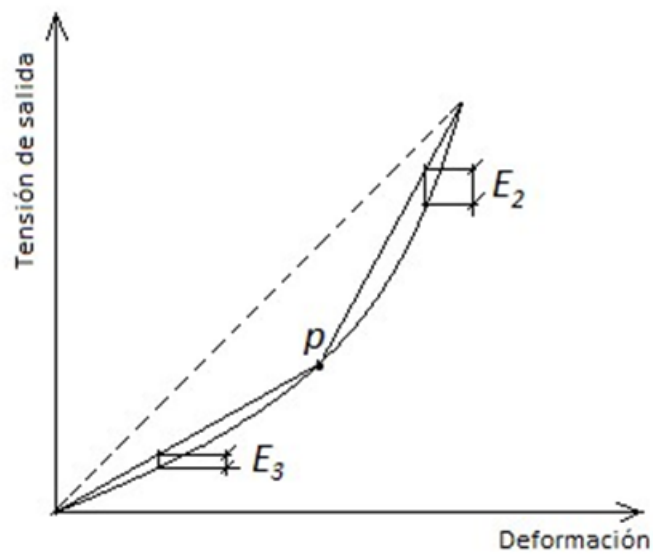


Figura 9 : Aproximación por dos rectas

El error en el punto P será:

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

Los errores V_2 y V_3 serán:

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

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

Si bien los valores de X e Y no son conocidos es posible decir que los errores E_2 y E_3 serán menores al 50% de E_{max} , por tanto:

$$E_{max} = 5\mu V$$

$$E'_{max} < 2,5\mu V$$

Con dos puntos de calibración más es posible reducir el error por no-linealidad a menos del 25% de E_{max} . El error para 3 puntos de calibración es:

$$E''_{max} \leq 1,25\mu V$$

Este error si es aceptable dentro de los parámetros de diseño.

Haciendo un breve análisis de costo para concluir si se utilizara este modelo o será necesario buscar otro:

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 TAL 220 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.

III. Alimentación : diseño y error inducido

Para realizar la alimentación de las celdas de cargas se implementó el circuito representado en la Figura 10. Se alimenta de la red (220V) y entrega una fuente continua de $\pm 15V$ para alimentar todos los componentes activos. y también será utilizado para referencia en una fuente de corriente para alimentar la celda de carga.

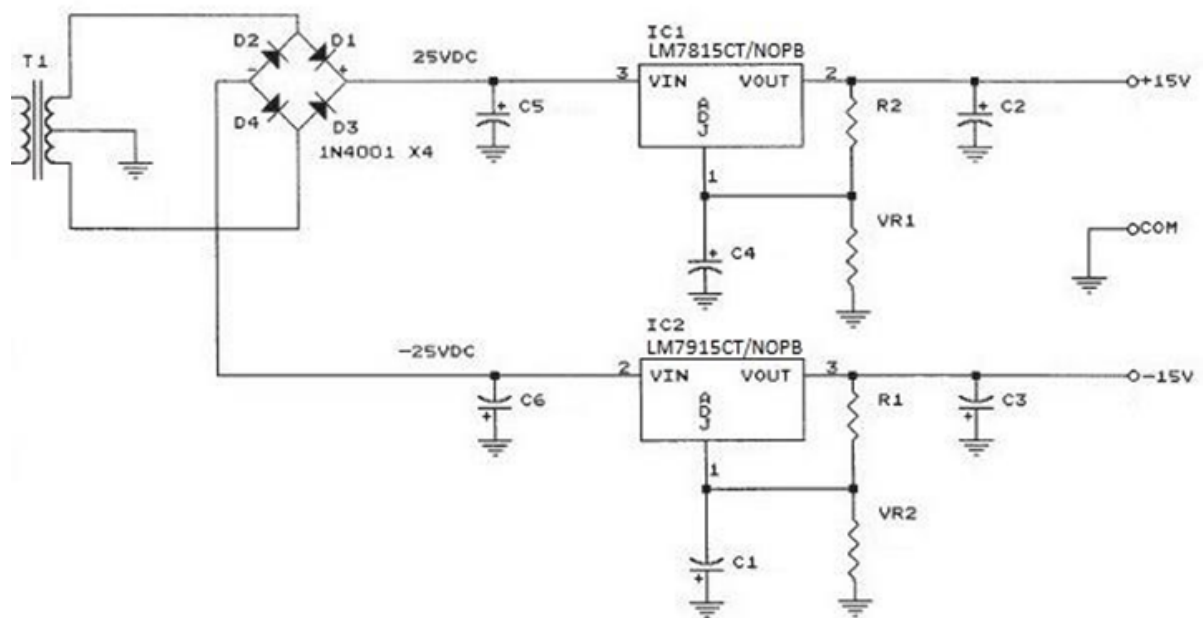


Figura 10: Circuito de alimentación $\pm 15V$

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 $+15V$ con un $\Delta V = 4mV$, esto se traduce como $2,67 \mu V$ de salida en la galga. Finalmente, el error a la salida del amplificador producto de la fuente será $0,267mV$.

IV. Combinación de todos los errores

A partir de los errores presentados previamente se puede verificar que la mayor parte de los errores son debidos a tensión de offset de la primera etapa de amplificación que provoca un error de $1,5 mV$. Por derivas térmicas que provocan hasta $1,27 mV$ para $0^{\circ}C$ y $0,75 mV$ para $40^{\circ}C$, sumando los dos errores tenemos que hay un error debido a la temperatura de $60,1 \mu V/^{\circ}C$. Por la propia celda, se tendrá un error por no-linealidad menor a $1,25 \mu V$.

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.

Finalmente haciendo un resumen de todos los errores:

- **Errores presentados por la celda de carga:**
 - Errores de continua: 0,5 mV
 - Errores de no-linealidad: <1,25 uV
- **Errores del circuito de amplificación:**
 - Errores de continua: 1,57 mV
- **Errores de la fuente:**
 - Errores de continua: 0,27 mV
- **Errores totales debido a la deriva térmica:**
 - 60,1 uV/°C
- **Error total:**
 - 2,34 mV (continua) + 1,25e(-3) mV (no-linealidad)

V. Especificaciones de la Balanza diseñada

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

VI. Recomendaciones para el programador del microcontrolador

VI.1 Display

El display mismo será de dígitos de 10 mm y va a tener un primer dígito para las unidades de kg, un punto indicando separación de los decimales y tres dígitos más indicando desde las unidades de gramos hasta las centenas de gramo.

VI.2 Peso muerto (Tara) y compensación de errores automática por software

Al encender la balanza la misma deberá esperar hasta que en el display presente que ya ocurrió la estabilización térmica y la compensación por peso muerto y por los errores de amplificadores operacionales y pone el display a cero, para siempre restar los errores de antemano y presentar un valor más adecuado. Al cabo de 2 minutos con peso muerto el microcontrolador entra en ahorro de energía donde se corregirá la variación por temperatura poniendo a cero constantemente. Cuando se detecte un cambio de peso brusco entonces se considerará medición y el display indicará lo debido.

VI.3 Puesta a cero manual

La balanza va tener una tecla que al presionarla tomará el valor de peso leído desde el ADC, tomando este valor como cero a permitir realizar la pesaje el envase, embalaje o cualquiera peso no deseado.

VI.4 Aviso de sobrecarga y de Peso límite excedido

En la situación del pesaje superar los 2 kg de peso útil, el display va mostrar de esta manera que el peso nominal ha sido superado. Y en la situación en que el peso total sobre la balanza supere los 3 kg, el display mostrará algún otro aviso más específico como, por ejemplo, ceros en todos los dígitos donde el operador tiene que retirar el producto para no romper las celdas.

VII. Costos de la Balanza

Los precios fueron determinados según la página proveedora Digikey¹ donde se consiguieron la mayor parte de los componentes, en general, a un menor precio considerando siempre la producción de 1000 balanzas a un precio competitivo. Además de la etapa electrónica, se investigó algún microcontrolador adecuado para hacer la etapa digital.

¹ <https://www.digikey.com/>

Componente	código del componente 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-REE L7TR-ND	4	1.23200	1.23200
Power transformers FP34-75-B	FP34-75-B-ND	1	6.72656	6.72656
Diodo 1N4001-TP	1N4001-TPMSC T-ND	4	0.01620	0.0648
LM7815CT/NOPB	296-44418-5-ND	1	0.70340	0.6650
LM7915CT/NOPB	LM7915CT/NOPB-ND	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 KEYPAD 12 KEY NON-ILLUM	1528-1136-ND	1	3.95000	3.95000
Calibración	-	-	-	0.234
TOTAL para una balanza producida				26.07

El costo de los componentes de una unidad producida será por tanto U\$S 26,07063.
 El costo de 1000 unidades proyectadas será entonces U\$S 26.070,63.

4. Conclusión

Se intentó con la realización del proyecto de la balanza cumplir todas las especificaciones solicitadas utilizando conocimiento técnico adquirido y buscando el menor costo posible para diseñar un producto comercialmente competitivo. A través de este proyecto fue posible tener una experiencia en el diseño de circuitos analógicos y ver los problemas que enfrenta al realizar los diseños. Un ejemplo de esto fue al principio del diseño en que se utilizaba otros componentes como el amplificador OPA4197IDR que tiene un costo más bajo, pero lo mismo no cumplía algunas de las exigencias y llevaba un error muy grande de la tensión de offset, esto implicó en su cambio por OP177FSZ y una análisis por otros amplificadores. La balanza final se encuentra adecuada al valor del proyecto y con un buen funcionamiento dado las especificaciones.