

Amplificadores para Características y calibración de sensores

Gabriela María Castro Beltrán, Juan Nicolás Carvajal Useche, Edgar Giovanny Obregon Espitia. *gcastrob@unal.edu.co, jcarvajalu@unal.edu.co, eobregon@unal.edu.co*
Universidad Nacional de Colombia

Resumen—En este informe de laboratorio se llevó a cabo la implementación de un puente Wheatstone y la utilización del amplificador de instrumentación AD-620 para acondicionar la señal de voltaje procedente de una celda de carga con el objetivo de obtener mediciones precisas de la resistencia de este sensor. De esta forma se llevaron a cabo mediciones de masa con carga ascendente y descendente para obtener la curva de calibración de la celda de carga y ajustar su sensibilidad y desviación del 0 para la construcción de una balanza. Se discutieron las propiedades de exactitud, precisión, y demás características estáticas de este sensor. Como segundo experimento, se utilizó aparte un par infrarrojo junto con una fuente pulsada para determinar la frecuencia de corte de este sistema.

Palabras Clave—Celda de carga, puente de Wheatstone, características estáticas de los sensores, par infrarrojo.

I. INTRODUCCIÓN

En la práctica, al trabajar con sensores, es importante tener en cuenta diferentes elementos debido a que los sensores tienen características tanto estáticas como dinámicas que pueden afectar la medición de la variable física real. Por lo tanto, es necesario calibrar el sensor para obtener una medición más fiable. Todos los sensores deben ser calibrados, aunque algunos sensores, como los termopares, pueden ser más difíciles de calibrar debido a su naturaleza no lineal. Por otro lado, sensores como los de humedad, flujo, presión y celda de carga son más amigables en su calibración. Las celdas de carga son un tipo de sensor que utiliza un conjunto de galgas extensiométricas para modificar su valor resistivo a partir de la deformación mecánica. Para medir el peso con una celda de carga, se utiliza un puente de Wheatstone, que es un circuito que genera un cambio de tensión proporcional al cambio de la resistencia de la galga.

Los objetivos que se buscan cumplir en esta práctica son: [1]

- Comprender el funcionamiento y manejo de la celda de carga.
- Usar un amplificador de instrumentación para obtener una señal de la celda de carga que sea fácil de manejar.
- Analizar varias de las características de los sensores.
- Llevar a cabo un procedimiento de calibración de un sensor, específicamente de la celda de carga.

En esta práctica se utilizará una celda de carga y se construirá un puente Wheatstone para obtener una señal de voltaje que sea proporcional al cambio de resistencia. Para acondicionar esta señal de voltaje resultante se usará un amplificador de instrumentación. Posteriormente, se realizarán mediciones en ascenso y descenso para obtener la curva de calibración y conocer algunas de sus características estáticas. Para concluir, se empleará un par infrarrojo y una fuente pulsada generada con Arduino para observar cómo funciona el par a diferentes frecuencias hasta alcanzar la frecuencia de corte.

II. MARCO TEÓRICO

II-A. Características estáticas de los sensores

[2]Cuando la cantidad a medir de un sensor no cambia en el tiempo, las características estáticas de los sensores representan el comportamiento de este frente a las mediciones que este puede hacer. Dentro de las características estáticas se destacan:

- Linealidad: Indica si el sistema de medición tiene el mismo valor de exactitud a lo largo de sus valores de referencia posibles. Se puede medir a través de un método de mínimos cuadrados para aproximar el comportamiento a una línea recta, también se puede representar midiendo las desviaciones máximas y mínimas en

términos de %FSO respecto a una línea recta, que puede ser de punto final, o de regresión. Concretamente, para la regresión con mínimos cuadrados, se busca linealizar los datos a un modelo $y = mx+b$, donde:

$$m = \frac{n \sum(xy) - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (1)$$

$$b = \frac{\sum(y) - m \sum x}{n} \quad (2)$$

- Histéresis: Dependencia de las entradas anteriores respecto a las entradas actuales que inducen un cambio en la medición. Se puede medir a través de la comparación entre las curvas de mediciones en ascenso y en descenso. Los valores de histéresis se pueden obtener mediante las fórmulas:

$$H = |y_{ascenso} - y_{descenso}| \quad (3)$$

$$h(\%) = H * \frac{100\%}{FSD} \quad (4)$$

- Exactitud: Es la diferencia entre el valor medido y el valor real, indica qué tan correcto es el experimento y siempre se busca minimizar el error. Su cuantificación está dada por la media calculada de las muestras de datos recogidas y su distancia al valor real.

$$e_{abs} = |X_{real} - X| \quad (5)$$

- Precisión: Define la diferencia entre los valores medidos en una muestra, es decir, la dispersión que presenta la muestra independiente al valor real. Está asociada a la desviación estándar de la muestra.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (6)$$

- Sensibilidad: Es la razón entre el incremento de la lectura por el incremento de la variable de entrada que lo ocasiona. Se puede medir a través de la pendiente de la curva de calibración.

$$\alpha = \frac{y_{máx} - y_{mín}}{x_{máx} - x_{mín}} \quad (7)$$

- Repetibilidad: Concordancia entre los resultados de varios experimentos de medición realizado en las mismas condiciones. Esto dará como resultado un valor máximo medido y un valor mínimo medido, con el que se puede hallar un rango de repetibilidad en el que oscilan las variaciones de una misma medida. Se puede

especificar el rango de variación de los datos de una misma medida realizada.

$$R = |V_{máx} - V_{mín}| \quad (8)$$

- Rango y SPAN de medida: Se definen como los límites del instrumento de medición, es decir, el intervalo de valores posibles de salida que puede brindar el instrumento. En general, se define el FSO (full scale output), que es la escala real de salida que se puede mostrar de una medición, por ejemplo, para el caso de la galga, es de 5, puesto que la galga soporta hasta 5kg.

II-B. Celda de carga

[3] Una celda de carga es un dispositivo que se usa para medir cargas mecánicas. Existen de varios rangos, desde 1kg, 5kg, 20kg, lo que significa que la celda será capaz de medir hasta estas denominaciones. Usualmente, una celda de carga se compone de una estructura mecánica, resistencias eléctricas y cables para la conexión a un circuito externo de medición, las resistencias usualmente van adheridas a la estructura mecánica, como es el caso de una galga. La estructura mecánica usualmente es un bloque o un perfil, el cual funciona como una viga en voladizo, ya que se encuentra empotrada en un extremo, y en el otro libre, en este extremo libre se coloca la carga a medir, lo cual generará un esfuerzo que deformará la celda, a su vez, la resistencia eléctrica también se deforma y esto ocasiona un cambio en su valor, lo cual genera una señal eléctrica que puede ser tratada y calibrada para que muestre el valor apropiado que se requiere. Una celda de carga de ejemplo se muestra en la figura 1. [3]

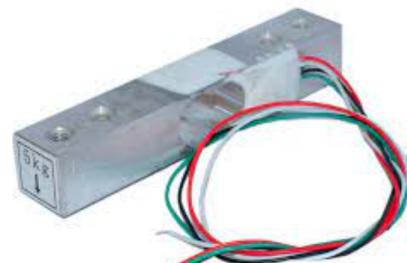


Figura 1. Celda de carga [3]

- Puente de Wheatstone: [4] Este circuito es utilizado para medir una resistencia eléctrica desconocida de un objeto o material,

es usado en aplicaciones de medición de variaciones de resistencia. [4] El esquemático de este circuito se muestra en la figura 2.

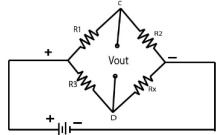


Figura 2. Esquemático del puente de wheatstone. [4]

El circuito consiste en cuatro resistencias conectadas como se muestra en la figura 2, se aplica una fuente de tensión y se mide la diferencia de potencial entre las ramas del circuito, cuando esta diferencia de potencial sea cero, significa que la tensión que cae por ambas ramas es la misma, por lo que a partir de las otras resistencias, se puede calcular la desconocida. El puente de Wheatstone se usa en medición de deformaciones o tensiones, en mediciones de temperatura, medición de fuerza, entre otros.

II-C. Amplificador de instrumentación

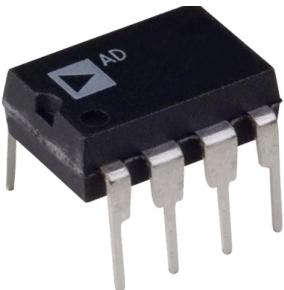


Figura 3. Amplificador de instrumentación AD-620. [5]

El AD620 es un amplificador de instrumentación de baja distorsión, alto rendimiento y bajo ruido fabricado por Analog Devices. Este dispositivo se utiliza comúnmente en aplicaciones que requieren alta precisión, tales como la amplificación de señales de sensores de temperatura, fuerza, presión y aceleración. Este dispositivo está diseñado con un circuito de tres etapas, las cuales son amplificador diferencial de entrada, un amplificador de ganancia y un amplificador de salida (ver figura 5). Su diseño de entrada diferencial permite la amplificación de señales diferenciales de entrada y la eliminación de señales de modo común, mejorando la relación señal-ruido y reduciendo la interferencia. [5]

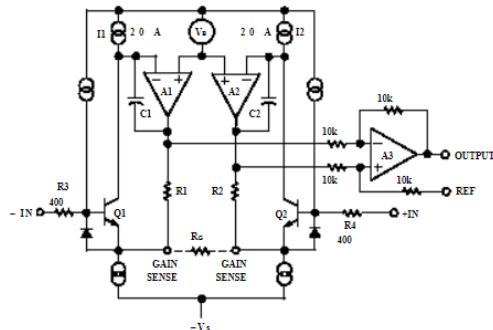


Figura 4. Esquemático simplificado del AD-620. [5]

CONNECTION DIAGRAM

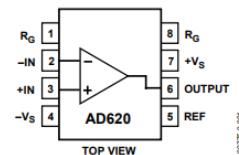


Figura 5. Diagrama de las conexiones del AD-620. [5]

Además, el AD620 tiene una alta impedancia de entrada y una ganancia ajustable mediante un resistor de realimentación externo, lo que lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones de medición y control. Su bajo consumo de energía y su diseño de bajo ruido también lo hacen ideal para aplicaciones portátiles y de baja potencia [5].

El cálculo de su ganancia está dado por su hoja de datos la cual indica la siguiente fórmula.

$$G = \frac{49,4k\Omega}{R_G} + 1 \quad (9)$$

$$R_G = \frac{49,4k\Omega}{G - 1} \quad (10)$$

El amplificador de instrumentación AD620 tiene un offset de entrada. El offset de entrada es la tensión que se requiere aplicar en la entrada de un amplificador para que la salida sea cero. El AD620 tiene un offset típico de entrada de $50 \mu\text{V}$, que puede variar según las condiciones ambientales y el circuito en el que se utiliza. Es importante tener en cuenta el offset de entrada al utilizar el AD620 en una aplicación de medición de señales de bajo nivel, ya que puede afectar la precisión de la medición. Se pueden tomar medidas para minimizar los efectos del offset, como ajustar el circuito de entrada o utilizar técnicas de calibración para corregir las mediciones.

II-D. Par infrarrojo Emisor-Receptor

[6] El par LED-sensor infrarrojo es una combinación comúnmente utilizada en aplicaciones de detección, control entre otras. El LED emite una señal de luz infrarroja, la cual es detectada por el sensor infrarrojo cuando es reflejada en un objeto o superficie, o es direccional directamente. La señal recibida por el sensor es entonces procesada para determinar la presencia o ausencia de un objeto en la zona de detección.

El principio de funcionamiento del sensor infrarrojo se basa en la detección de la radiación electromagnética en el rango de los infrarrojos, el cual es invisible al ojo humano. El sensor está compuesto por un fotodiodo o fototransistor que convierte la señal infrarroja en una señal eléctrica. A medida que la intensidad de la señal infrarroja recibida por el sensor cambia, la corriente que fluye a través del fotodiodo o fototransistor varía también. Esta variación de la corriente es entonces amplificada y procesada para determinar si la señal recibida es lo suficientemente fuerte como para considerar que hay presencia de un objeto o no.

El LED, por su parte, emite luz infrarroja cuando se aplica una corriente eléctrica a través de él. La intensidad de la luz emitida por el LED puede ser controlada variando la corriente que fluye a través de él, lo que permite ajustar la sensibilidad del sistema de detección. Un ejemplo de este se observa en la figura 6.



Figura 6. Led y sensor infrarrojo. [7]

III. PROCEDIMIENTO

III-A. Celda de carga

El objetivo de este experimento es caracterizar y calibrar los sensores para medir diferentes parámetros, con el fin de obtener mediciones precisas y confiables. La caracterización de los sensores permite conocer su respuesta ante diferentes estímulos, mientras que la calibración ajusta los valores medidos a los valores reales, minimizando así los errores de medición. En este experimento, se llevará a cabo la caracterización y calibración de una celda de carga para medir el peso, mediante la obtención de curvas de ascenso y descenso. Para ello, se preparan 10 objetos con 0.5kg cada uno y se realizan mediciones para cada peso, tanto en ascenso como en descenso.

Los materiales necesarios para este experimento incluyen:

- Celda de carga
- Una balanza de cocina
- 10 objetos con diferentes pesos
- Protoboard
- Amplificador de instrumentación (AD-620)
- Resistencias de diferentes valores.

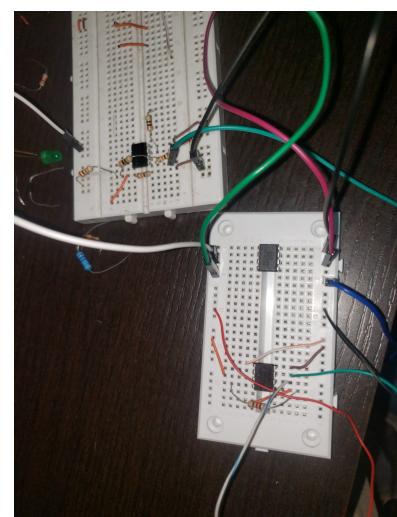


Figura 7. Montaje realizado para el AD-620 y el sumador.



Figura 8. Montaje realizado para la celda de carga.

Se realiza un montaje experimental (ver figura 7), conectando el puente de Wheatstone y el amplificador de instrumentación. Primero, se determina la salida natural de la celda, esto se hace midiendo la caída de tensión a la salida (cables blanco y verde) que muestra cuando se le cuelga un determinado peso, para este caso se mide con un multímetro el valor de tensión obtenido con un peso de 1kg, lo cual arroja 4mV, con este se calcula el valor de la ganancia para obtener el valor de tensión deseado para mostrar 1V/1kg. La ganancia del amplificador requerida se calcula a través de la ecuación 10, donde se determina que para obtener una ganancia de 250, es necesaria una resistencia de $200\ \Omega$. Esta ganancia es usada para la calibración y así obtener la relación deseada (1V/1kg).

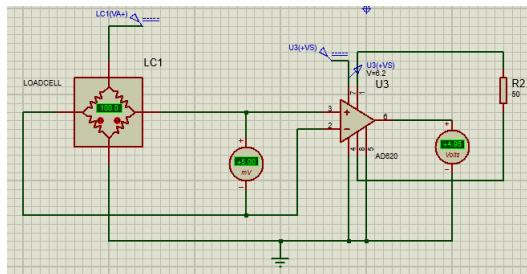


Figura 9. Simulación realizada en el software de Proteus.

Una parte adicional que se debe realizar para la calibración de las mediciones, es tomar en cuenta el offset del amplificador AD-620. En este caso es del orden de los 700mV y se procede a ajustar el circuito con un restador de 0,7V como se observa en la figura 10. Final-

mente estando calibrado el sensor, se realiza los siguientes pasos para la obtención de datos:

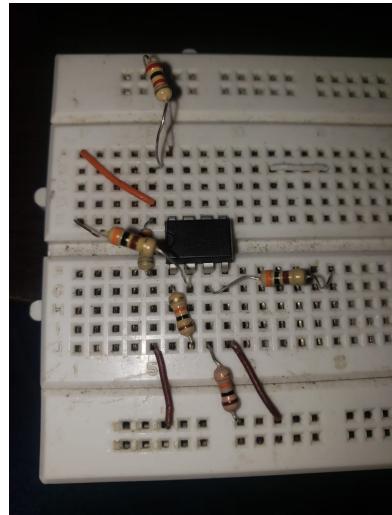


Figura 10. Montaje realizado para el restador con un LM358.

1. Calibración y amplificador de instrumentación
2. Preparar 10 objetos de 0.5kg cada uno, con una balanza corroborar su valor verdadero.
3. Posteriormente se debe colocar el primer peso conocido sobre la celda, anotar el dato arrojado por el multímetro, retirar el objeto de la galga y realizar la siguiente medición poniendo un peso inmediatamente mayor (0kg, 0.5kg, 1kg, 1.5kg, etc), al llegar al peso más alto (5kg), se debe realizar el mismo proceso de manera descendiente (hasta llegar a 0kg). Repetir este proceso en otras 5 ocasiones para obtener un total de 6 mediciones para cada peso. Estos son los datos de las mediciones con descarga.
4. Se debe utilizar la misma serie de objetos de peso conocido que se utilizó en la etapa anterior. En esta ocasión, solo se realizará una medición por peso, pero no se levantará el peso de la celda cada vez que se realice una medición. Para las mediciones en ascenso, se debe colocar el primer objeto sobre la celda y realizar la medición, luego se debe agregar el segundo objeto y así sucesivamente hasta completar los 10 pesos. Para las mediciones en descenso, los 10 objetos de peso conocido deben estar sobre la celda de carga, se debe tomar la medición y luego quitar un objeto (0.5kg), anotar el valor, y repetir

este proceso hasta quitar todos los objetos. Estas son las mediciones sin descarga.

5. Obtenidos los datos de las mediciones, se calculan las propiedades de linealidad, histéresis, exactitud, precisión y todas las demás.

A partir de estos resultados, se hizo el tratamiento apropiado y los resultados fueron analizados para obtener las características del sensor.

III-B. Sensor infrarrojo

El objetivo de la segunda parte del laboratorio es poder identificar la frecuencia de corte del sensor infrarrojo, probando la correcta recepción de este al enviar una señal cuadrada por el led infrarrojo a diferentes frecuencias.

- Sensor infrarrojo o foto transistor.
- Led infrarrojo.
- Resistencia de 330ω y $2K\omega$.
- Osciloscopio.
- Generador de señales.

Se comienza conectando el led infrarrojo la generador de señales con la resistencia de 330ω , enfrentado al sensor infrarrojo el cual se polariza a 5V, y se mide la señal en la resistencia como se muestra en la figura 11.

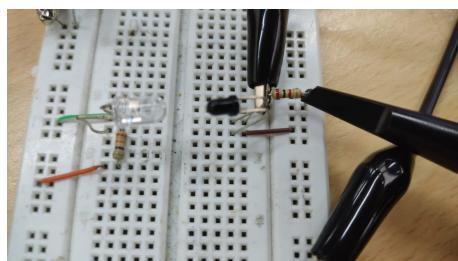


Figura 11. Montaje sensor infrarrojo.

Luego se procede a enviar una señal cuadrada desde 1 HZ hasta 2KHZ, dando saltos de por 10 en cada iteración, debido a que el sensor responde muy bien a bajas frecuencias, luego de 2KHZ hasta 5KHZ, se fue aumentando de 500 en 500, debido a que aquí el sensor empezaba a llegar a su frecuencia de corte, y por último de 5KHZ hasta 10KHZ, el sensor ya había dejado de responder de una forma óptima por lo que se fue aumentando de a 1kHz.

IV. RESULTADOS OBTENIDOS

IV-A. Celda de carga

IV-A1. Mediciones con descarga: Los resultados de los datos obtenidos para algunas

mediciones en ascenso se pueden observar en las figuras 12,13,14,15 y 16, mientras que los datos obtenidos para algunas mediciones en descenso se pueden observar en las figuras 17,18,19,20 y 21. En estas imágenes, se pueden apreciar claramente las diferentes magnitudes medidas, así como los instrumentos utilizados para llevar a cabo las mediciones. Las fotografías ofrecen una representación visual detallada de los resultados obtenidos, lo que permite una mejor comprensión de los datos recopilados y de las conclusiones a las que se ha llegado.



Figura 12. Medición en ascenso para 1 kilogramo con descarga.



Figura 13. Medición en ascenso para 2 kilogramos con descarga.



Figura 14. Medición en ascenso para 3 kilogramos con descarga.



Figura 17. Medición en descenso para 1 kilogramo con descarga.



Figura 15. Medición en ascenso para 4 kilogramos con descarga.



Figura 18. Medición en descenso para 2 kilogramos con descarga.



Figura 16. Medición en ascenso para 5 kilogramos con descarga.



Figura 19. Medición en descenso para 3 kilogramos con descarga.



Figura 20. Medición en descenso para 4 kilogramos con descarga.

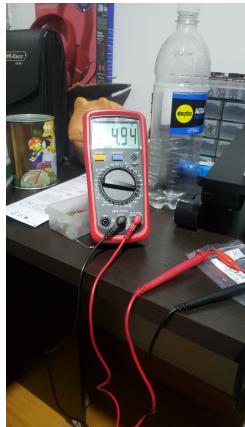


Figura 21. Medición en descenso para 5 kilogramos con descarga.

Los resultados para las mediciones con descarga se muestran en las siguientes tablas.

Peso real (kg)	Ascenso					
	Salida del multímetro (V)					
	Iteración					
	1	2	3	4	5	6
0	0,17	0,13	0,15	0,13	0,15	0,12
0,5	0,23	0,15	0,214	0,18	0,143	0,14
1	1,06	0,97	0,99	1,024	0,96	0,99
1,5	1,48	1,39	1,39	1,38	1,432	1,48
2	2,07	2,02	1,98	1,88	2,06	1,98
2,5	2,01	2,41	2,36	2,38	2,47	2,54
3	3,26	2,87	2,98	3	2,95	2,99
3,5	3,48	3,42	3,329	3,44	3,51	3,41
4	4,1	4,14	3,89	4,12	4,02	3,98
4,5	4,52	4,49	4,39	4,56	4,51	4,45
5	4,91	4,83	4,91	4,85	4,891	4,92

Cuadro I

TABLA 1. DATOS OBTENIDOS CON DESCARGA EN ASCENSO.

Promedio	Exactitud			Presición
	Error absoluto	%FSO	%R	
0,142	0,142	2,833	100,000	0,018
0,142	0,358	7,167	252,941	0,018
1,063	0,063	1,260	5,928	0,043
1,543	0,043	0,867	2,808	0,048
2,057	0,057	1,133	2,755	0,034
2,615	0,115	2,300	4,398	0,148
3,152	0,152	3,033	4,812	0,087
3,543	0,043	0,857	1,209	0,076
4,138	0,138	2,767	3,343	0,024
4,504	0,004	0,073	0,081	0,078
4,885	0,115	2,297	2,351	0,037

Cuadro II

TABLA 2. CÁLCULOS DEL PROMEDIO, EXACTITUD Y PRECISIÓN CON DESCARGA EN ASCENSO.

Ascenso		
Linealidad (Punto final)	En términos de %FSO	Rango de repetibilidad (V)
Diferencia		
0,142	0,02833333	0,05
-0,323	-0,06453333	0,09
-0,001	-0,000018	0,1
-0,072	-0,0144	0,1
-0,002	-0,00033333	0,19
-0,138	-0,02766667	0,53
0,008	0,00166667	0,39
-0,067	-0,01333333	0,172
0,042	0,00833333	0,25
-0,013	-0,0026	0,17
-0,115	-0,02296667	0,09

Cuadro III

TABLA 3. CÁLCULOS DE LA LINEALIDAD Y EL RANGO DE REPETIBILIDAD CON DESCARGA EN ASCENSO.

Peso real (kg)	Descenso					
	Salida del multímetro (V)					
	Iteración					
	1	2	3	4	5	6
0	0,27	0,25	0,19	0,24	0,15	0,18
0,5	0,29	0,18	0,21	0,18	0,22	0,17
1	1,36	1,14	1,21	1,08	1,14	1,2
1,5	1,67	1,71	1,52	1,45	1,55	1,64
2	2,14	2,21	2,012	2,11	2,18	2,08
2,5	2,59	2,58	2,61	2,58	2,49	2,49
3	3,3	2,96	2,98	3,1	3,16	2,9
3,5	3,68	3,73	3,68	3,53	3,59	3,53
4	3,99	4,32	4,24	4	4,14	4,19
4,5	4,78	4,53	4,521	4,63	4,65	4,52
5	4,92	4,89	4,9	4,97	5,01	4,91

Cuadro IV

TABLA 4. DATOS OBTENIDOS CON DESCARGA EN DESCENSO.

Promedio	Exactitud			Presición
	Error absoluto	%FSO	%R	
0,213	0,213	4,267	100,000	0,047
0,213	0,287	5,733	134,375	0,047
1,280	0,280	5,600	21,875	0,087
1,590	0,090	1,800	5,660	0,099
2,240	0,240	4,800	10,714	0,134
2,558	0,058	1,157	2,261	0,051
3,422	0,422	8,433	12,323	0,080
3,660	0,160	3,207	4,380	0,078
4,537	0,537	10,733	11,830	0,280
4,754	0,254	5,070	5,333	0,053
4,892	0,108	2,167	2,215	0,023

Cuadro V

TABLA 5. CÁLCULOS DEL PROMEDIO, EXACTITUD Y PRECISIÓN CON DESCARGA EN DESCENSO.

Precisión	Ascenso y descenso			
	Histéresis		Linealidad (Punto final)	
H	h (%)	Diferencia	En términos de %FSO	
0,050	0,072	0,014	0,178	0,036
0,043	0,031	0,006	-0,307	-0,061
0,121	0,190	0,038	0,094	0,019
0,112	0,162	0,032	0,009	0,002
0,093	0,125	0,025	0,061	0,012
0,165	0,196	0,039	-0,040	-0,008
0,137	0,058	0,012	0,037	0,007
0,124	0,194	0,039	0,030	0,006
0,123	0,105	0,021	0,094	0,019
0,103	0,121	0,024	0,047	0,009
0,047	0,048	0,010	-0,091	-0,018

Cuadro VIII

TABLA 8. PRECISIÓN, HISTÉRESIS Y LINEALIDAD CON DESCARGA EN ASCENSO Y DESCENSO.

Descenso		
Linealidad (Punto final)	Rango de repetibilidad (V)	
Diferencia	En términos de %FSO	
0,213	0,04266667	0,12
-0,292	-0,05833333	0,12
0,189	0,03776667	0,277
0,090	0,018	0,26
0,123	0,0246	0,198
0,058	0,01156667	0,12
0,066	0,0132	0,4
0,127	0,0254	0,201
0,147	0,0294	0,33
0,108	0,0216	0,27
-0,067	-0,01333333	0,12

Cuadro VI

TABLA 6. CÁLCULOS DE LA LINEALIDAD Y EL RANGO DE REPETIBILIDAD CON DESCARGA EN DESCENSO.

Ascenso y descenso			
Peso real (kg)	Promedio (V)	Exactitud	
		Error absoluto	%FSO
0	0,178	0,1775	0,0355
0,5	0,193	0,3072	0,0614
1	1,094	0,0940	0,0188
1,5	1,509	0,0090	0,0018
2	2,061	0,0607	0,0121
2,5	2,460	0,0402	0,0080
3	3,037	0,0372	0,0074
3,5	3,530	0,0302	0,0060
4	4,094	0,0943	0,0189
4,5	4,548	0,0475	0,0095
5	4,909	0,0907	0,0182

Cuadro VII

TABLA 7. CÁLCULOS DEL PROMEDIO, EXACTITUD Y PRECISIÓN CON DESCARGA EN ASCENSO Y DESCENSO.

Sensibilidad (V/kg)	0,95382083
Zona muerta	De 0kg a 0,5kg aprox.
Linealidad (PF)	0,0355 -0,06143333

Cuadro IX

SENSIBILIDAD, ZONA MUERTA Y LINEALIDAD EN %FSO DE PUNTO FINAL DEL ENSAYO CON DESCARGA

Ascenso y descenso			
Peso real (kg)	Promedio (V)	xy	x^2
0,5	0,612	0,30583333	0,25
1	1,172	1,17150833	1
1,5	1,567	2,35	2,25
2	2,148	4,29666667	4
2,5	2,586	6,46604167	6,25
3	3,287	9,86	9
3,5	3,602	12,6055417	12,25
4	4,338	17,35	16
4,5	4,629	20,828625	20,25
5	4,888	24,4420833	25

Cuadro X

FACTORES PARA EL CÁLCULO DE LOS MÍNIMOS CUADRADOS EN LA MEDICIÓN CON DESCARGA

Mínimos cuadrados
m
b

Cuadro XI

RESULTADOS DE LOS MÍNIMOS CUADRADOS CON DESCARGA

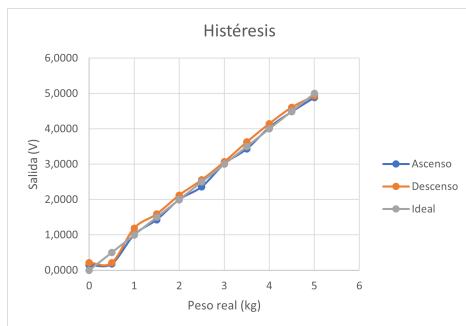


Figura 22. Histéresis con descarga.

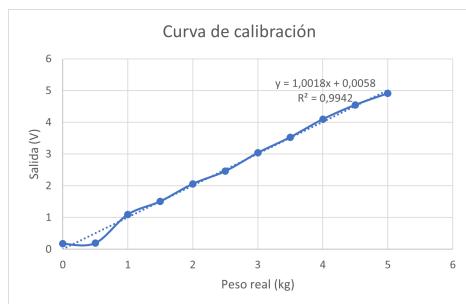


Figura 23. Curva de calibración con descarga.

IV-A2. Mediciones sin descarga: A continuación se puede observar las distintas mediciones sin descargar peso.



Figura 24. Medición en ascenso para 1 kilogramo sin descarga.



Figura 26. Medición en ascenso para 3 kilogramos sin descarga.



Figura 27. Medición en descenso para 4 kilogramos sin descarga.



Figura 28. Medición en descenso para 5 kilogramos sin descarga.

Peso real (kg)	Ascenso					
	Salida del multímetro (V)					
	Iteración					
1	2	3	4	5	6	
0	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
0,5	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
1	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97
1,5	1,41	1,41	1,41	1,40	1,39	1,39
2	2,00	2,00	2,00	1,99	1,99	1,98
2,5	2,45	2,44	2,44	2,44	2,44	2,43
3	3,06	2,91	2,91	3,01	3,01	3,02
3,5	3,45	3,44	3,45	3,45	3,44	3,45
4	3,99	4,00	4,00	3,99	3,99	4,00
4,5	4,51	4,51	4,51	4,50	4,50	4,49
5	4,93	4,94	4,95	4,94	4,95	4,94

Cuadro XII

TABLA 12. DATOS OBTENIDOS SIN DESCARGA EN ASCENSO.

Ascenso		
Diferencia	Linealidad (Punto final)	Rango de repetibilidad (V)
	En términos de %FSO	
0,0339	0,0068	0,0122
-0,4673	-0,0935	0,0076
-0,0337	-0,0067	0,0160
-0,0999	-0,0200	0,0238
-0,0090	-0,0018	0,0185
-0,0601	-0,0120	0,0234
-0,0117	-0,0023	0,1490
-0,0526	-0,0105	0,0099
-0,0053	-0,0011	0,0093
0,0039	0,0008	0,0213
-0,0609	-0,0122	0,0157

Cuadro XIV

TABLA 14. CÁLCULOS DE LA LINEALIDAD Y EL RANGO DE REPETIBILIDAD SIN DESCARGA EN ASCENSO.

Peso real (kg)	Descenso					
	Salida del multímetro (V)					
	Iteración					
1	2	3	4	5	6	
0	0,110	0,105	0,108	0,100	0,098	0,092
0,5	0,110	0,111	0,116	0,117	0,126	0,117
1	1,160	1,000	0,993	1,001	0,991	0,988
1,5	1,630	1,626	1,635	1,635	1,629	1,634
2	2,130	2,127	2,126	2,118	2,112	2,110
2,5	2,640	2,638	2,634	2,626	2,623	2,626
3	3,116	3,108	3,116	3,107	3,106	3,097
3,5	3,589	3,584	3,584	3,588	3,581	3,581
4	4,012	4,019	4,013	4,006	4,010	4,005
4,5	4,530	4,521	4,512	4,518	4,518	4,517
5	4,930	4,940	4,943	4,939	4,945	4,937

Cuadro XV

TABLA 15. DATOS OBTENIDOS SIN DESCARGA EN DESCENSO.

Promedio (V)	Ascenso		
	Exactitud		Precisión
	Error absoluto	%FSO	
0,034	0,034	0,007	1,000
0,033	0,467	0,093	14,286
0,966	0,034	0,007	0,035
1,400	0,100	0,020	0,071
1,991	0,009	0,002	0,005
2,440	0,060	0,012	0,025
2,988	0,012	0,002	0,004
3,447	0,053	0,011	0,015
3,995	0,005	0,001	0,001
4,504	0,004	0,001	0,001
4,939	0,061	0,012	0,012

Cuadro XIII

TABLA 13. CÁLCULOS DEL PROMEDIO, EXACTITUD Y PRECISIÓN SIN DESCARGA EN ASCENSO

Promedio (V)	Descenso		
	Exactitud		Precisión
	Error absoluto	%FSO	
0,102	0,102	0,020	1,000
0,116	0,384	0,077	3,302
1,022	0,022	0,004	0,022
1,632	0,132	0,026	0,081
2,121	0,121	0,024	0,057
2,631	0,131	0,026	0,050
3,108	0,108	0,022	0,035
3,584	0,084	0,017	0,024
4,011	0,011	0,002	0,003
4,519	0,019	0,004	0,004
4,939	0,061	0,012	0,012

Cuadro XVI

TABLA 16. CÁLCULOS DEL PROMEDIO, EXACTITUD Y PRECISIÓN SIN DESCARGA EN DESCENSO.

Descenso		
Linealidad (Punto final)		Rango de repetibilidad (V)
Diferencia	En términos de %FSO	
0,102	0,02042723	0,01834518
-0,384	-0,07675356	0,0163498
0,022	0,00446048	0,1716216
0,132	0,02630006	0,00984903
0,121	0,02411524	0,0201411
0,131	0,02624349	0,01679138
0,108	0,02167436	0,01932374
0,084	0,01689622	0,00814878
0,011	0,00212803	0,01426312
0,019	0,00384501	0,01819553
-0,061	-0,01218109	0,01470417

Cuadro XVII

TABLA 17. CÁLCULOS DE LA LINEALIDAD Y EL RANGO DE REPETIBILIDAD SIN DESCARGA EN DESCENSO.

Sensibilidad (V/kg)	0,986197081
Zona muerta	De 0kg a 0,5kg aprox.
Linealidad (PF)	0,013602347 -0,085105736

Cuadro XX

SENSIBILIDAD, ZONA MUERTA Y LINEALIDAD EN %FSO DE PUNTO FINAL OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES SIN DESCARGA

Ascenso y descenso			
Peso real (kg)	Promedio (V)	xy	x^2
0,5	0,066	0,03313628	0,25
1	0,991	0,99066627	1
1,5	1,506	2,25959147	2,25
2	2,055	4,10914415	4
2,5	2,548	6,37058382	6,25
3	3,049	9,14591458	9
3,5	3,508	12,2792136	12,25
4	4,002	16,0060318	16
4,5	4,508	20,2845816	20,25
5	4,931	24,6544403	25

Cuadro XXI

FACTORES CALCULADOS PARA EL CÁLCULO DE MÍNIMOS CUADRADOS EN LAS MEDICIONES SIN DESCARGA

Mínimos cuadrados	
m	1,03025597
b	-0,11013938

Cuadro XXII

RESULTADOS DE LOS MÍNIMOS CUADRADOS

Ascenso y descenso				
Peso real (kg)	Promedio (V)	Exactitud		
		Error absoluto	%FSO	%R
0	0,068	0,068	0,014	1,000
0,5	0,074	0,426	0,085	5,714
1	0,994	0,006	0,001	0,006
1,5	1,516	0,016	0,003	0,010
2	2,056	0,056	0,011	0,027
2,5	2,536	0,036	0,007	0,014
3	3,048	0,048	0,010	0,016
3,5	3,516	0,016	0,003	0,005
4	4,003	0,003	0,001	0,001
4,5	4,512	0,012	0,002	0,003
5	4,939	0,061	0,012	0,012

Cuadro XVIII

TABLA 18. CÁLCULOS DEL PROMEDIO, EXACTITUD Y PRECISIÓN SIN DESCARGA EN ASCENSO Y DESCENSO

Precisión	Ascenso y descenso		Histéresis		Linealidad (Punto final)	
	H	h (%)	Diferencia	En términos de %FSO		
0,0360	0,068	0,014	0,068	0,0136		
0,0439	0,083	0,017	-0,425	-0,0851		
0,0543	0,056	0,011	-0,005	-0,0011		
0,1211	0,231	0,046	0,016	0,0032		
0,0681	0,129	0,026	0,056	0,0112		
0,1002	0,191	0,038	0,036	0,0071		
0,0755	0,120	0,024	0,048	0,0097		
0,0717	0,137	0,027	0,016	0,0032		
0,0093	0,016	0,003	0,003	0,0005		
0,0105	0,015	0,003	0,012	0,0023		
0,0054	0,000	0,000	-0,061	-0,0122		

Cuadro XIX

TABLA 19. PRECISIÓN, HISTÉRESIS Y LINEALIDAD SIN DESCARGA EN ASCENSO Y DESCENSO.

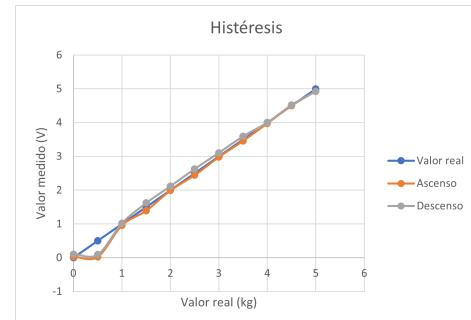


Figura 29. Histéresis sin descarga.

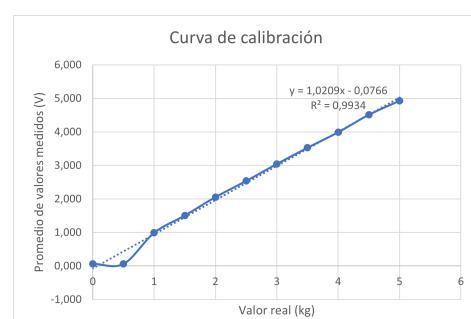


Figura 30. Curva de calibración sin descarga.

IV-B. Sensor infrarrojo

A continuación se mostraran las mediciones de cada iteración de frecuencia efectuada en el sensor infrarrojo.

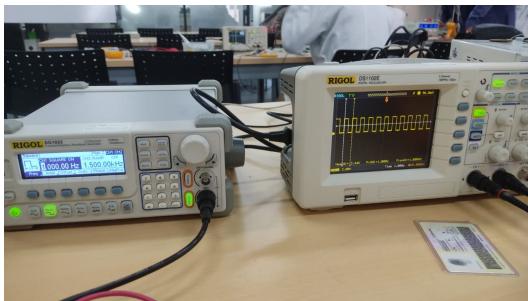


Figura 31. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 1 Hz.

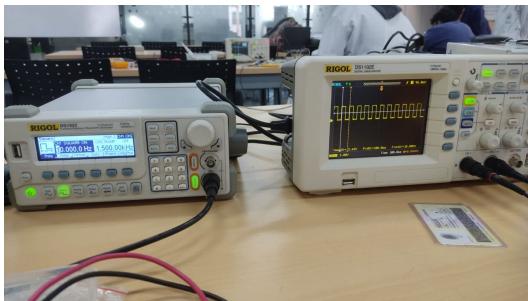


Figura 32. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 10 Hz.

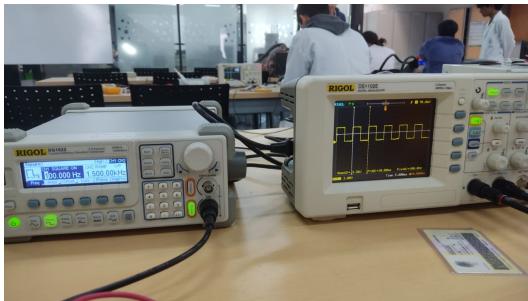


Figura 33. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 100 Hz.

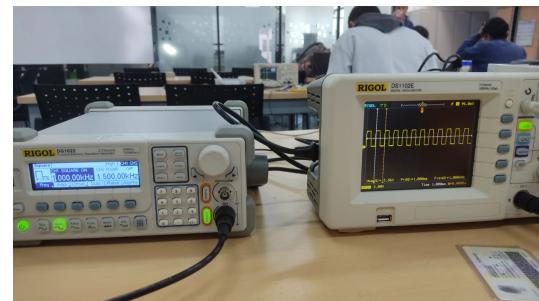


Figura 34. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 1KHz.



Figura 35. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 2KHz.



Figura 36. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 2.5Khz.

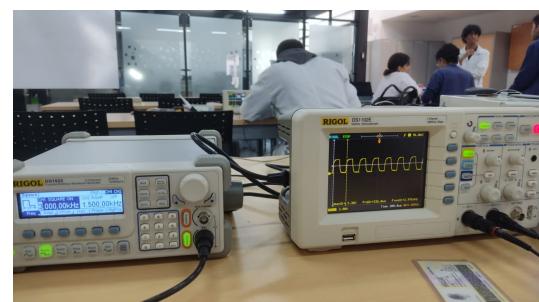


Figura 37. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 3Khz.



Figura 38. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 3.5Khz.

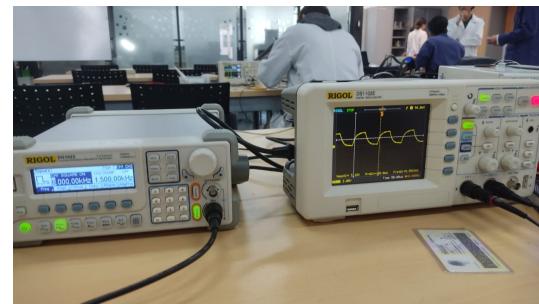


Figura 42. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 6Khz.



Figura 39. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 4Khz.

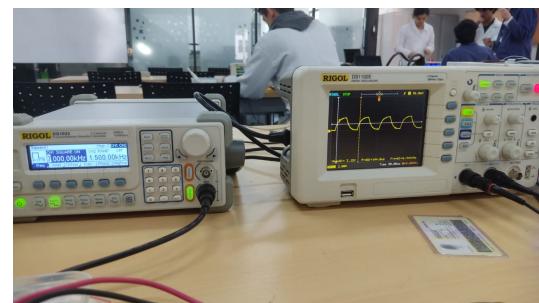


Figura 43. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 7Khz.



Figura 40. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 4.5Khz.

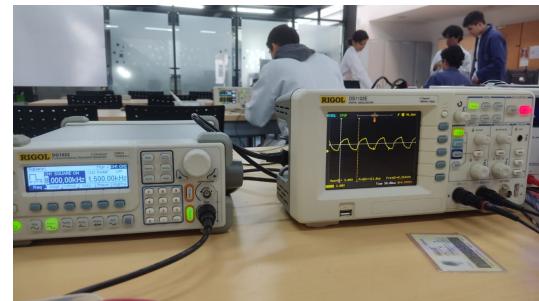


Figura 44. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 8Khz.



Figura 41. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 5Khz.

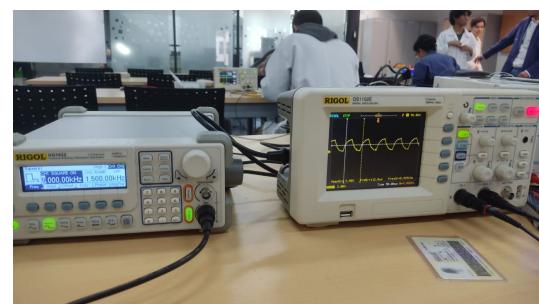


Figura 45. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 9Khz.

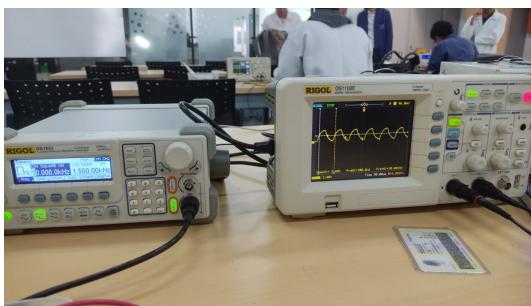


Figura 46. Medición de señal cuadrada a frecuencia de 10KHz.

Recopilando los datos de tensión máxima y frecuencia de la señal se obtiene.

Frecuencia de la señal (HZ)	Tensión máxima (V)
1	3.44
10	3.44
100	3.36
1000	3.36
2000	3.36
2500	3.36
3000	3.36
3500	3.2
4000	3.2
4500	2.96
5000	3.04
6000	3.12
7000	3.12
8000	3.04
9000	2.96
10000	2.88

V. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Los resultados obtenidos muestran el comportamiento y las características estáticas del sensor.

V-A. Datos con descarga

En el presente informe de laboratorio de mediciones con descarga con la celda de carga, se presenta el análisis de varios errores en las mediciones, que son la exactitud, la precisión, la linealidad, el rango de repetibilidad, la histéresis, zona muerta y deriva. A continuación, se profundizará en cada uno de ellos:

V-A1. Zona muerta: Para la zona muerta, se tiene que la celda de carga posee unos rango en los cuales posee una sensibilidad nula, haciendo que la entrada no varíe la salida, dado los datos obtenidos en las tablas 13 y 16, se observa que para los pesos de 0 kg y 0,5 kg, las mediciones obtenidas no cambian hasta que se le aplica un peso mayor a 0,5 kg, de esta manera el rango de valores para los cuales existe una zona muerta en la celda de carga es de alrededor 0kg a 0,5 kg.

V-A2. Exactitud: Para la exactitud dada para los datos obtenidos tanto en las mediciones realizadas en ascenso como en descenso y despreciando los rango de valores que se encuentran en la zona muerta, se observa que los valores medidos se acercan de gran manera al valor real, y también la variación del valor medido con respecto al valor máximo que el sensor puede medir, exceptuando algunas alteraciones que pueden ser ocasionadas por la calidad del equipo de medición, la calibración del equipo y las condiciones ambientales.

En la realización de estas medidas se presentaron algunos inconvenientes con el montaje físico, ya que las conexiones de la celdas de carga con el amplificador de instrumentación no hacían buen contacto por lo que se tuvieron que desmontar varias veces.

V-A3. Precisión: Para la precisión de las medidas tomadas para ascenso y descenso con descarga, se adquiere una desviación estándar baja, por lo que los datos no son dispersión entre sí, un ejemplo de esto se puede observar en la tabla 8, siendo el dato más alejado el de la carga de 2,5 kg con un valor de precisión de 0,196. Dando como resultado unas mediciones precisas.

V-A4. Linealidad y sensibilidad: En la linealidad, se evalúa la linealidad en el punto final, que se refiere al grado en que la salida del equipo de medición varía cuando la entrada alcanza el valor máximo. Para estos datos se tiene una buena proporcionalidad, ya que el %FSO no sobrepasa el 0,07% , esto se debe a que se calibra de manera adecuada el sensor, además de poseer una fuente de alimentación estable. Como se observa en la gráfica de la curva de calibración (figura 23), se comporta de manera lineal con una pendiente de 1, esto se puede comprobar con el método de mínimos cuadrados donde la pendiente de 0,96 es cercana a 1 y la intersección b de 0,24 es cercana a 0.

V-A5. Repetibilidad: La repetibilidad es la capacidad de un instrumento de medición para obtener resultados consistentes en mediciones repetidas bajo las mismas condiciones. En los datos proporcionados en las tablas 3 y 6 , se evaluó el rango de repetibilidad para ambas mediciones (ascenso y descenso) y se encontró que el instrumento tiene una capacidad razonablemente buena para obtener resultados consistentes en mediciones repetidas bajo las mismas condiciones para ambos casos de medición. La repetibilidad es una característica deseable en un instrumento de medición, ya

que puede indicar una mayor confiabilidad y precisión en las mediciones.

V-A6. Histéresis: En los datos proporcionados, la histéresis se define como la diferencia máxima entre las mediciones en el mismo punto en el ciclo de subida y bajada. Los valores de histéresis oscilan entre 0.006V y 0.039V para ambas mediciones, lo que sugiere que la histéresis en el sensor es baja. En este caso, los valores bajos de histéresis sugieren que el sensor puede ser utilizado de manera confiable en diversas aplicaciones. La figura 22 muestra la curva de histéresis obtenida en la medición con descarga. Se observa que la curva de descarga se encuentra por debajo de la curva de ascenso, lo que indica la presencia de histéresis en el sistema de medición. La histéresis puede deberse a la deformación elástica del material.

V-A7. Deriva: La deriva en los instrumentos de medición se refiere al cambio gradual y no deseado en la medición que ocurre con el tiempo, incluso cuando el instrumento se mantiene constante. Por lo que al utilizar el amplificador de instrumentación resulta un offset de 0,6 V siendo corregido por el restador. En el caso de los datos con descarga se obtuvo una calibración deseada corrigiendo ese offset.

V-B. Datos sin descarga

En el caso de los datos sin descarga, se analizaron las siguientes características:

V-B1. Exactitud: De los datos calculados para las curvas de ascenso, descenso y el promedio de estas (tablas 13, 16 y 18), se puede observar que las mediciones para 0.5kg son las que menor exactitud presentan, esto debido a que se encuentra en una zona muerta, donde se detecta un 0, por lo que este se considera un dato atípico que en primera medida no se debe tener en cuenta en la exactitud. Además de esto, se observa que los valores de exactitud calculados en términos de error absoluto no superan el orden de las centésimas, en %FSO no superan el 1% y en %R los valores también son pequeños. En conclusión, esta parte del experimento tuvo una buena exactitud, ya que los datos tomados no se alejaron del valor real en gran medida, esto debido a que los pesos usados fueron bien medidos.

V-B2. Precisión: En cuanto a la precisión (tablas 13, 16 y 18), representada a través de la desviación estándar, los datos demuestran que las muestras tomadas no presentan dispersión significativa, el dato que tuvo mayor desviación estándar fue el de 1.5kg en el promedio

de ascenso y descenso, que tuvo 0.12 de desviación, sin embargo este valor sigue siendo aceptable puesto que los datos seguían guardando una buena correspondencia. Además, el dato atípico de la zona muerta (0.5kg) aquí no se destaca porque a pesar de que está alejado del valor deseado, las medidas tomadas en este valor no fueron dispersas. En general, se tuvo una muy buena precisión debido a un buen uso de los implementos de medición, a la reducción de errores por el montaje y por la toma cuidadosa de datos.

V-B3. Linealidad: Las medidas de linealidad (tablas 14, 17 y 19) usando el método de punto final muestran una buena linealidad, ya que las desviaciones en términos de %FSO fueron muy cercanas al 0, por ejemplo para la curva promediada se tuvo una linealidad de -0,08%, +0,01% FSO. También de la gráfica de la figura 30, se observa visualmente que el comportamiento de los datos se asemeja a una línea recta, por lo que se determina que el sensor tiene comportamiento lineal. Además, del análisis de mínimos cuadrados, se obtuvo una pendiente de 1.03 y un corte de -0.1, lo cual se aproxima mucho a los valores de calibración que se deseaban, para el caso de la pendiente, esta fue muy cercana a 1 lo cual representa lo requerido, concluyendo que la calibración de la ganancia fue adecuada, así mismo, el valor del corte estuvo un poco alejado del 0, pero este error se ve más atribuido a la toma de datos que al proceso de calibración, puesto que el restador implementado para el offset funcionaba correctamente con el 0, pero los distintos errores de medición pudieron haber alterado la regresión planteada. A pesar de todo, se logró tener un comportamiento muy cercano al lineal deseado.

V-B4. Repetibilidad: Los datos (tablas 14 y 17) estuvieron acotados siempre dentro de un intervalo de un rango pequeño, de los resultados no se destaca un rango que supere el orden de 10^{-2} , por lo que la probabilidad de que se pueda repetir un dato es alta, en este caso específico, se repitieron algunas medidas, pero nada de manera significativa, es decir que la moda no sería un dato representativo de las muestras tomadas, por lo que no se destaca.

V-B5. Histéresis: De la tabla de los valores promediados sin descarga (Tabla 19) y de la figura 29, se observa que la celda presenta una histéresis leve, primero, porque todas sus mediciones en ascenso tienden a estar por debajo del valor real, mientras que las mediciones en descenso tienden a estar por encima, esto se ve

claramente en la gráfica, además, la histéresis se ve más pronunciada en la zona media de la curva de calibración mientras que en los extremos estos valores son menores. La mayor histéresis se presentó en la medida de 1.5kg y de 2.5 kg, donde la diferencia es de 0.2V en las mediciones de ascenso y descenso.

V-B6. Zona muerta: En el caso de este sensor, y para este experimento cuyo paso era de 0.5kg, se detectó que existe una zona muerta por lo menos hasta 0.5kg, esto se evidencia porque al colgar 0.5kg, sin importar que esté en ascenso o descenso, en carga o descarga el sensor marca un valor muy aproximado a 0, por eso mismo este dato puede ser descartado al calcular regresiones que representan el comportamiento del sensor y demás variables como exactitud o precisión, pero debe ser tenido en cuenta.

V-B7. Deriva: Como se explicó en la calibración, la deriva no depende de la carga o descarga, sino del instrumento, por lo que el offset de 0.6V fue corregido con el sumador. En el caso particular de los datos sin descarga, se observa que esta implementación permitió corregir la curva de calibración como se deseaba y por ende, obtener los datos despreciando este error.

V-C. Sensor infrarrojo

Se puede observar que el sistema responde de una manera correcta a frecuencias por debajo de los 2000HZ a los 3000HZ, y a partir de este punto, el sensor no alcanza a seguir correctamente la señal cuadrada, sino que la señal se va distorsionando porque no puede alcanzar su tensión máxima, esto se puede reflejar en el siguiente diagrama de bode.

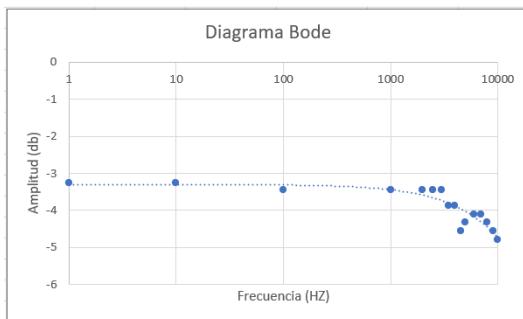


Figura 47. Diagrama de Bode para el sensor infrarrojo.

VI. CONCLUSIONES

De esta práctica, se concluye que:

- A pesar de que el experimento con la celda de carga logró evidenciar las características más importantes, se podría refinar los resultados tomando un paso de carga menor (como 0.3kg), para poder observar mejor la zona muerta y el desempeño de la celda para más valores.
- Los resultados muestran que la celda de carga es un buen elemento de medición, no es costoso y es sencillo de implementar, por lo que puede ser bueno para aplicaciones de baja exigencia y que requieran exactitudes no muy altas.
- Se observa una baja histéresis para los datos con descarga y sin descarga en los datos, esto indica que cualquier efecto que se observe en el sistema (como cambios de temperatura o fuerzas aplicadas) tiene un impacto relativamente pequeño en su comportamiento posterior. Esto puede ser útil para ciertas aplicaciones que deben ser altamente estables.
- Se puede observar que el sensor infrarrojo responde muy bien a bajas frecuencias. Sin embargo, al llegar a la frecuencia de corte, que se encuentra entre los 2000Hz y los 3000Hz, este sensor comienza a presentar fallas de medición debido a que no puede alcanzar el estado estacionario.
- En conclusión, la deriva en los instrumentos de medición es un fenómeno común que puede afectar la precisión y la exactitud de las mediciones. Es importante tener en cuenta la deriva al utilizar los instrumentos de medición y tomar medidas para minimizar su impacto.

REFERENCIAS

- [1] Práctica 2: Amplificadores para Características y calibración de sensores. Universidad Nacional de Colombia, 2023 [Online]. Available: <https://classroom.google.com/u/0/c/NTQyNDI0ODYyMTUz/a/NTQyNDI1MDg2MjM4/details?hl=es> [Accessed: 18-mar-2023]
- [2] METROLOGÍA INDUSTRIAL, SISTEMAS DE MEDICIÓN Y ASEGURAMIENTO METROLÓGICO. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2023 [Online]. Available: <https://classroom.google.com/c/NTQyNDI0ODYyMTUz/m/NTQyNDI1MDg2MjMy/details> [Accessed: 18-mar-2023]
- [3] P. Precision, “¿Qué son las celdas de carga y cómo funcionan?,” Blog PRECISION. [Online]. Available: <https://blog.precision.cl/celdas-de-carga-tipos-definicion#:~:text=El%20principio%20de%20funcionamiento%20de,y%20estirarse%20seg%C3%BAn%20sea%20necesario>. [Accessed: 23-Mar-2023].
- [4] E. F. C. Chala and E. F. C. Chala, “Puente de Wheatstone,” VISTRONICA S.A.S, 08-Jul-2020. [Online]. Available: <https://www.vistronica.com/blog/post/puente-de-wheatstone-.html>. [Accessed: 23-Mar-2023].

- [5] "Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier-AD620," Sigma Electrónica, 10-Jan-2023. [Online]. Available: <https://www.sigmaelectronica.net/wp-content/uploads/2008/05/AD620.pdf>. [Accessed: 18-Mar-2023].
- [6] "5mm Phototransistor T-1 , " Everlight. [Online]. Available: https://download.mikroe.com/documents/datasheets/PT334-6B_datasheet.pdf [Accessed: 18-Mar-2023].
- [7] "PT334-6B Datasheet,"Microchip, Jan. 2021. [En línea]. Disponible: https://download.mikroe.com/documents/datasheets/PT334-6B_datasheet.pdf. [Accedido: 24 - Mar-2023].