

Proyecto Balanza con Galga Extensiometrica

Diseño e Implementación del Acondicionamiento: Ajuste de cero (CERO) y Ajuste de Ganancia (Escala máxima)

Jorge Santiago Camargo Guerrero
jocamargog@unal.edu.co

Sebastian Jaramillo Verdugo
sejaramillov@unal.edu.co

Resumen—En la presente práctica se diseñó, implementó y calibró un sistema de medición de peso utilizando una celda de carga de 1 kg y un amplificador de instrumentación AD620. El acondicionamiento de señal permitió amplificar la salida diferencial de la celda de carga, inicialmente del orden de milivoltios, hasta un rango de 0–5 V, compatible con el conversor analógico-digital (ADC) del microcontrolador Arduino Uno. Se realizaron análisis de linealidad, sensibilidad, resolución e incertidumbre mediante mediciones experimentales repetidas. La calibración alcanzó una pendiente de 5 mV/g con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,9996$, indicando una excelente linealidad del sistema. El modelo obtenido es adecuado para aplicaciones prácticas de medición de masa, asegurando confiabilidad y precisión. La implementación exclusiva del AD620 como etapa de acondicionamiento permitió simplificar el circuito sin sacrificar exactitud ni estabilidad.

I. PALABRAS CLAVE

Celda de carga, AD620, acondicionamiento de señal, amplificador de instrumentación, curva característica, calibración, incertidumbre, sensibilidad, linealidad.

II. INTRODUCCIÓN

La medición precisa del peso es esencial en procesos industriales y aplicaciones de control donde la confiabilidad de las mediciones es crítica. En esta práctica se implementó un sistema de medición de peso basado en una celda de carga con galgas extensiométricas, cuyo principio de funcionamiento se basa en la conversión de deformaciones mecánicas en señales eléctricas mediante un puente de Wheatstone. Dado que la señal de salida es del orden de milivoltios, fue necesario diseñar una etapa de acondicionamiento de señal utilizando un amplificador de instrumentación AD620, permitiendo escalar la señal al rango de 0–5 V, compatible con el conversor analógico-digital (ADC) del Arduino Uno. El sistema desarrollado se complementó con una interfaz gráfica en MATLAB para visualizar en tiempo real las mediciones. Durante el desarrollo, se evaluaron características estáticas del sistema (sensibilidad, linealidad, resolución, histéresis y exactitud), así como el análisis de incertidumbre y respuesta dinámica, garantizando el diseño y calibración de un sistema de medición confiable y trazable.

III. MARCO TEÓRICO

En esta práctica se realiza la caracterización estática de una celda de carga basada en galgas extensiométricas, acoplada a un puente de Wheatstone y acondicionada mediante un amplificador de instrumentación AD620. El objetivo principal es obtener la curva característica del sistema, la recta ideal asociada y evaluar las desviaciones producto de las no linealidades del sistema de medición.

III-A. Celda de carga y puente de Wheatstone

Una *galga extensiométrica* es un sensor resistivo cuya resistencia varía al someterse a deformaciones mecánicas. Estas galgas suelen adherirse a un elemento elástico (como una viga) que se deforma ante la aplicación de una carga. Las galgas se conectan eléctricamente en configuración de puente de Wheatstone para maximizar la sensibilidad y cancelar efectos comunes como los cambios de temperatura.

El puente de Wheatstone, alimentado con una tensión de excitación V_{exc} , genera una señal de salida diferencial V_{out} que es proporcional a la deformación diferencial en las ramas activas del puente. Su expresión generalizada es:

$$V_{out} = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{exc}$$

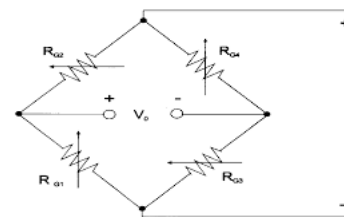


Figura 1: Puente de Wheatstone equivalente a las galgas extensiometricas (Alimentar la celda de carga con una fuente de 5V, entre los terminales E+ y E-)

donde R_1, R_2, R_3, R_4 representan las resistencias del puente, algunas de las cuales son galgas activas.

III-B. Uso del Amplificador de Instrumentación en el Acondicionamiento de Señal

La señal de salida del puente de Wheatstone es del orden de milivoltios, por lo que requiere una etapa de *preacondicionamiento* para ser amplificada antes de su digitalización. Para esto se utiliza un **amplificador de instrumentación**, como el **AD620**, que ofrece:

- **Alta impedancia de entrada**, evitando carga sobre el puente.
- **Alto rechazo en modo común (CMRR)**, que reduce el ruido e interferencias.
- **Ganancia programable y estable**, determinada por una resistencia externa R_G :

$$G = 1 + \frac{49,4 \text{ k}\Omega}{R_G}$$

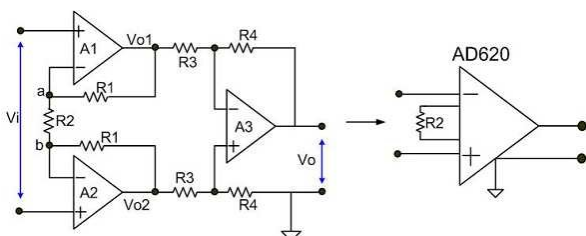


Figura 2: Circuito esquemático amplificador AD620. $R_2 = R_G$.

En esta práctica se alimenta el AD620 con una fuente simple de 12 V y referencia ajustada a 2,52 V para adaptar la salida al rango del ADC del microcontrolador (Arduino Uno), cuya entrada varía entre 0 y 5 V.

Este amplificador permite adaptar la salida del sensor al rango del ADC del microcontrolador, manteniendo la linealidad de la señal y garantizando una buena relación señal-ruido.

III-C. Conversión Analógico-Digital con Arduino

El sistema utiliza una placa Arduino Uno para digitalizar la señal amplificada. Esta placa cuenta con un **convertidor analógico-digital (ADC)** de 10 bits, que transforma la entrada analógica en un valor digital entre 0 y 1023. La conversión se calcula mediante:

$$\text{Digital} = \frac{V_{in} \cdot 1024}{V_{ref}}$$

donde V_{ref} es el voltaje de referencia de ADC (5V) y V_{in} representa la tensión analógica de la entrada.

III-D. Curva característica y recta ideal

La *curva característica* del sistema representa la relación entre la masa aplicada (m) y la tensión de salida (V) medida a la salida del amplificador. En condiciones ideales, esta relación es lineal:

$$V = S \cdot m + V_0$$

donde S es la sensibilidad del sistema (pendiente) y V_0 es la salida en vacío (offset).

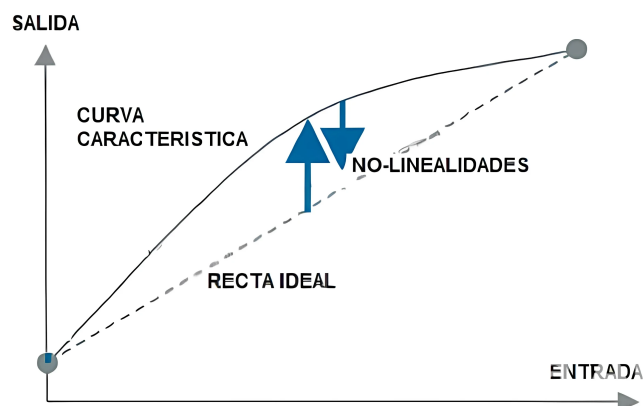


Figura 3: Curva característica, Recta Ideal, y No Linealidad.

III-E. No linealidades

En la práctica, la respuesta del sistema puede desviarse de la recta ideal debido a efectos de histéresis, errores mecánicos, saturación del amplificador, tolerancias de componentes o ruido. La *no linealidad* se cuantifica como la máxima desviación entre los puntos reales de la curva y la recta ideal, expresada como porcentaje de la salida máxima:

$$\text{N.L. (\%)} = \frac{\max |V_{real} - V_{ideal}|}{V_{m\acute{a}x}} \cdot 100$$

Una correcta caracterización incluye la medición de estos errores, así como el uso de filtros pasivos (como un filtro RC de primer orden) para mitigar el ruido presente en la señal adquirida.

El análisis de **características estáticas** comprende:

- **Sensibilidad:** Razón entre la variación de la salida y la entrada.
- **Linealidad:** Grado de ajuste entre la curva real y una recta ideal.
- **Resolución:** Mínima variación de entrada que produce un cambio en la salida.
- **Histéresis:** Diferencia en la salida al aplicar una misma entrada en sentidos opuestos.
- **Zona muerta:** Intervalo de entrada que no genera cambio apreciable en la salida.

- **Repetibilidad:** Dispersión de las lecturas para entradas constantes repetidas.
- **Exactitud:** Cercanía entre el valor medido y el valor verdadero.

Por otro lado, se debe realizar un análisis de **incertidumbre**, el cual se divide en:

- **Tipo A:** Evaluada mediante el análisis estadístico de mediciones repetidas.
- **Tipo B:** Estimada con base en la resolución del instrumento, tolerancias y documentación técnica.

La incertidumbre combinada u_c se calcula como:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

y la incertidumbre expandida U se obtiene multiplicando la combinada por un factor de cobertura k , típicamente $k = 2$, para un nivel de confianza del 95 %.

En caso de que la variable de interés dependa de múltiples magnitudes medidas, se utiliza la ley de propagación de la incertidumbre, que en el caso de una función $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ toma la forma:

$$u_c(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} u(x_1)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} u(x_n)\right)^2}$$

Este marco conceptual permite establecer la trazabilidad, confiabilidad y validez de las mediciones obtenidas durante el experimento.

III-F. Respuesta Dinámica: Modelado como Sistema de Primer Orden

Además del análisis estático, es fundamental caracterizar la respuesta dinámica del sistema de medición. Esto permite evaluar el tiempo que tarda el sistema en alcanzar un nuevo estado estable ante una perturbación súbita, como lo sería la adición o retiro de una masa sobre la celda de carga.

Para ello, se puede aplicar una perturbación tipo **escalón (paso)** o un **paso invertido**, consistente en retirar bruscamente una parte de la carga tras estabilizar la medición. Esta estrategia reduce la posibilidad de inducir oscilaciones de segundo orden, típicas de sistemas masa-resorte, como ocurriría si se dejara caer una masa.

La señal de salida se registra mediante la GUI de MATLAB. A partir de la curva obtenida, se analiza si la dinámica del sistema puede aproximarse a la de un **sistema lineal de primer orden**, cuya función de transferencia típica es:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

donde:

- K es la ganancia estática del sistema (respuesta final).
- τ es la constante de tiempo del sistema.

El comportamiento temporal del sistema ante un escalón de entrada está dado por:

$$y(t) = K \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Una forma práctica de estimar τ es identificar el tiempo en el cual la respuesta alcanza el 63.2 % del valor final. El tiempo de establecimiento t_s , definido comúnmente como el tiempo necesario para que la salida permanezca dentro del 2 % del valor final, también puede ser determinado experimentalmente.

La Figura 4 ilustra este comportamiento típico.

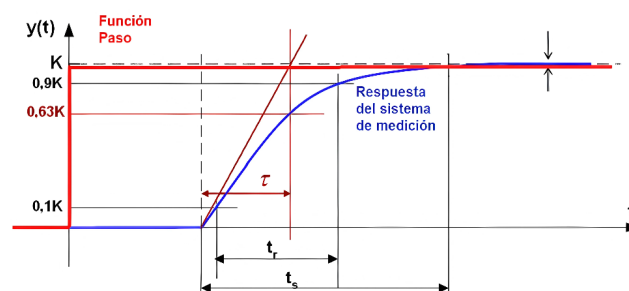


Figura 4: Respuesta paso aproximada a un sistema de primer orden.

IV. SIMULACIONES Y CÁLCULOS

IV-A. Objetivo de la Simulación

La simulación tuvo como objetivo verificar el comportamiento del sistema de acondicionamiento de señal basado únicamente en el amplificador de instrumentación **AD620**, configurado con un trimmer de 60Ω y un potenciómetro en el pin de referencia para eliminar el offset. Se buscó comprobar:

- La proporcionalidad entre la masa aplicada y la salida de voltaje (linealidad).
- El ajuste correcto del offset a través del pin REF.
- Que el voltaje de salida se encuentre dentro del rango de 0–5V para su digitalización por el ADC del Arduino.
- La respuesta dinámica del sistema ante perturbaciones abruptas (paso inverso).

IV-B. Herramienta Utilizada

Se utilizó el software **LTspice** para modelar el circuito. La celda de carga se representó como una fuente diferencial de baja magnitud (0–7mV), correspondiente a masas entre 0g y 1000g.

IV-C. Circuito Simulado

El circuito incluyó:

- Una señal de entrada diferencial (salida simulada del puente de Wheatstone).
- El amplificador AD620 con una resistencia de ganancia $R_G = 60 \Omega$.
- Un potenciómetro conectado al pin REF para anular el offset.
- Alimentación simétrica de $\pm 10V$.

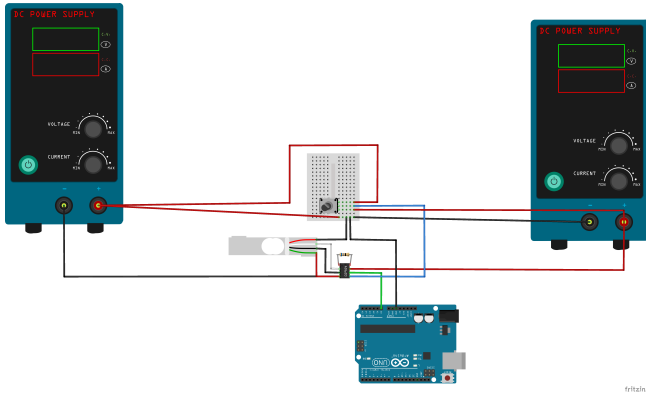


Figura 5: Circuito simulado

IV-D. Cálculo de la Ganancia del AD620

El amplificador de instrumentación AD620 permite establecer su ganancia mediante una resistencia externa R_G conectada entre los pines 1 y 8. La fórmula para la ganancia es:

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

En esta práctica, se usó un trimmer de 60Ω para ajustar R_G . Sustituyendo en la ecuación:

$$\begin{aligned} G &= 1 + \frac{49,4 \times 10^3 \Omega}{60 \Omega} \\ &= 1 + 823,33 \\ &\approx 824,33 \end{aligned}$$

Esta ganancia teórica amplifica directamente la señal diferencial proveniente del puente de galgas (del orden de milivoltios) a un nivel de voltaje adecuado (del orden de voltios) para ser leído por el conversor analógico-digital (ADC) del Arduino.

IV-E. Verificación del Rango de Salida

La celda de carga tiene una sensibilidad nominal aproximada de 1 mV/V , y se alimentó con 5 V , lo que implica una salida diferencial máxima de aproximadamente:

$$V_{in \text{ max}} = 1 \text{ mV/V} \times 5 \text{ V} = 5 \text{ mV} \quad (2)$$

La salida esperada del AD620 para esta entrada sería:

$$\begin{aligned} V_{out} &= G \cdot V_{in} \\ &= 824,33 \cdot 5 \text{ mV} \\ &= 4,1217 \text{ V} \end{aligned}$$

Esto demuestra que con la ganancia elegida y el ajuste de offset, el sistema puede mapear el rango de entrada de 0–1000g en un rango de salida de aproximadamente 0–4.1V, adecuado para el ADC del Arduino (0–5V), con margen para evitar saturación.

IV-F. Sensibilidad del Sistema

La sensibilidad S representa la pendiente de la curva característica, es decir, la variación de voltaje por cada unidad de masa:

$$\begin{aligned} S &= \frac{\Delta V}{\Delta m} = \frac{4,1 \text{ V} - 0 \text{ V}}{1000 \text{ g} - 0 \text{ g}} \\ &= 0,0041 \text{ V/g} = 4,1 \text{ mV/g} \end{aligned}$$

Esta sensibilidad garantiza que el sistema puede detectar pequeños cambios de masa con resolución suficiente, dado que la resolución mínima detectable del ADC de 10 bits es:

$$\Delta_{ADC} = \frac{5 \text{ V}}{1024} \approx 4,88 \text{ mV} \quad (3)$$

Por tanto, el sistema resuelve aproximadamente 1.2 gramos por bit.

IV-G. Respuesta Dinámica Simulada

Se simuló una retirada brusca de carga (paso inverso), observando una caída exponencial del voltaje, típica de un sistema de primer orden. La respuesta temporal se aproxima por:

$$V(t) = V_f + (V_0 - V_f)e^{-t/\tau} \quad (4)$$

donde τ representa la constante de tiempo, y se estimó como el tiempo necesario para alcanzar el 63.2 % del cambio total de voltaje.

IV-H. Gráficas de la Simulación

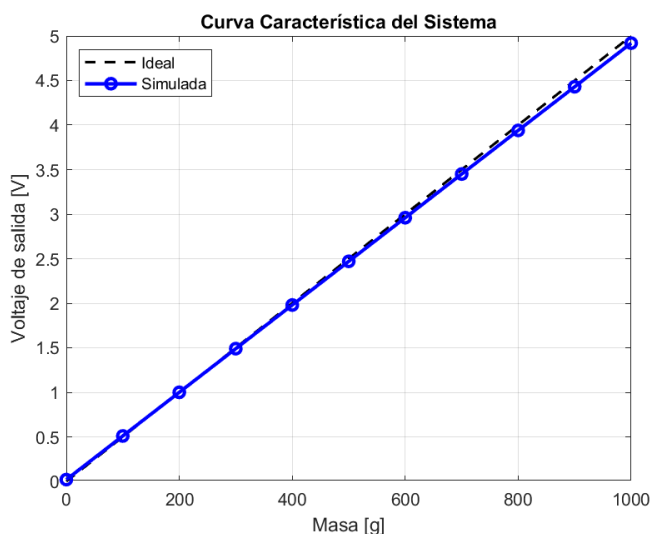


Figura 6: Curva esperada

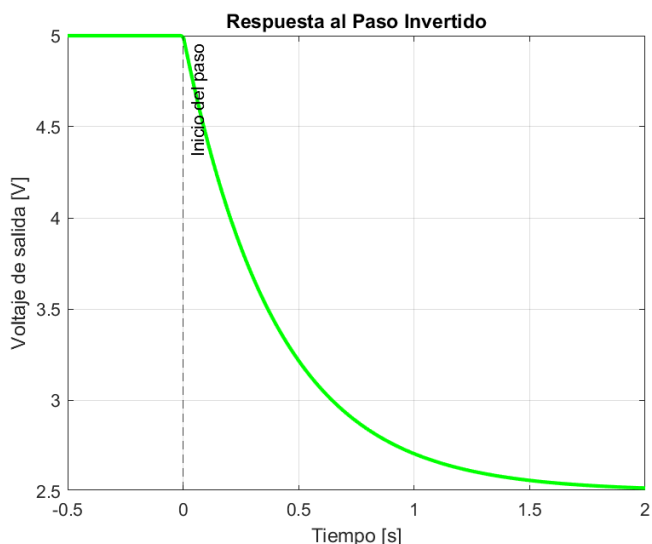


Figura 7: Respuesta transitoria

V. CIRCUITO ESQUEMÁTICO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

V-A. Descripción General del Sistema de Medición

El sistema de medición implementado en esta práctica está basado en una **celda de carga de 1kg** cuya señal se acondiciona utilizando exclusivamente un **amplificador de instrumentación AD620**. Esta señal acondicionada se digitaliza mediante el conversor analógico-digital (ADC) del **Arduino Uno**, y se visualiza en tiempo real a través de una **interfaz gráfica en MATLAB (GUI)**.

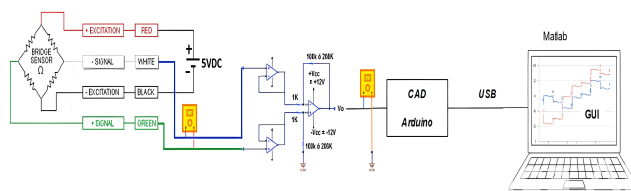


Figura 8: Esquema proyecto

V-B. Etapas del Sistema

El sistema completo consta de las siguientes etapas:

- **Sensor:** Celda de carga con galgas extensiométricas en configuración de puente de Wheatstone, alimentada con 5 VDC. Su salida es una señal diferencial del orden de milivoltios.
- **Acondicionamiento:** La señal diferencial se amplifica utilizando un amplificador de instrumentación AD620, con:
 - **Ganancia ajustada** mediante un trimmer de 60 Ω , conectado entre los pines 1 y 8 del AD620.
 - **Offset eliminado** con un potenciómetro conectado al pin de referencia (REF), permitiendo que la salida sea 0 V para una masa nula.
- **Digitalización:** El voltaje amplificado se ingresa al pin analógico del Arduino, que lo convierte en un valor digital (resolución de 10 bits, rango 0–5V).
- **Visualización:** Los datos digitales se envían al computador por puerto USB, y se visualizan en tiempo real mediante una GUI en MATLAB, mostrando el valor de masa en gramos y la evolución temporal.

V-C. Circuito Implementado

El circuito final implementado se basa únicamente en el AD620. La ganancia se ajusta mediante un trimmer de 60 Ω , y el offset mediante un potenciómetro en el pin 5 (REF).

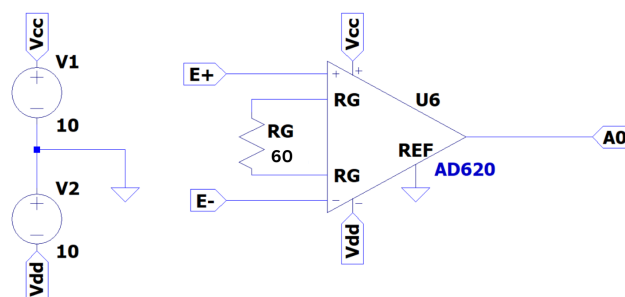


Figura 9: Esquemático AD620 con 60 Ohms

V-D. Especificaciones Relevantes del AD620

- **Rango de ganancia:** 1 a 10000 (ajustable con R_G).
- **Ganancia usada:** ≈ 824 , calculada con $R_G = 60 \Omega$.
- **Alimentación:** $\pm 6 \text{ V}$.

- **Salida esperada:** de 0 a ~ 5 V para el rango de 0–1000g.
- **Offset ajustado:** mediante potenciómetro en el pin REF, logrando salida nula sin carga.

V-E. Ventajas del Diseño

Este esquema presenta varias ventajas:

- Reducción de componentes (no se requiere segunda etapa con AO).
- Alta estabilidad y baja deriva gracias al AD620.
- Offset controlado de forma precisa sin necesidad de circuitos restadores.
- Salida directamente compatible con el ADC del Arduino.

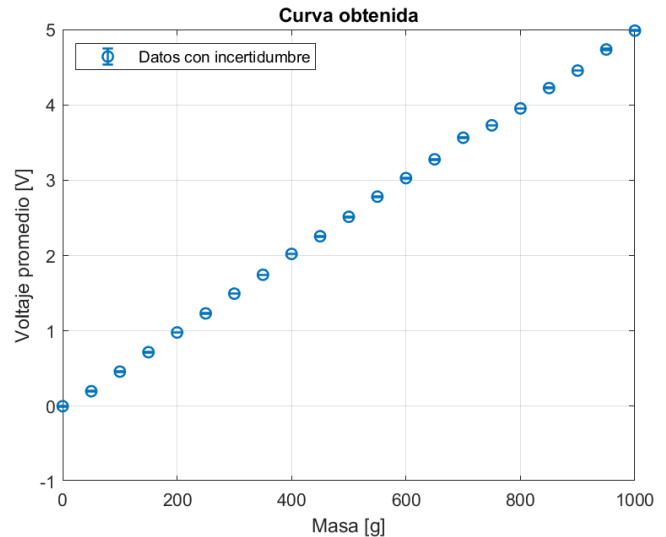


Figura 10: Recta real

VI. RESULTADOS EXPERIMENTALES

VI-A. Mediciones y Promedios

Se realizaron 20 mediciones de voltaje para cada masa entre 0g y 1000g, en pasos de 50g. A partir de los datos obtenidos, se calcularon los valores medios y las desviaciones estándar. Estas mediciones permiten caracterizar la curva de transferencia del sistema de medición.

TABLA I: Voltaje promedio medido para cada valor de masa (20 mediciones por punto)

Masa (g)	Voltaje promedio (V)
0	0.000000
50	0.198888
100	0.458645
150	0.717475
200	0.978693
250	1.231935
300	1.494150
350	1.743962
400	2.021507
450	2.255585
500	2.513600
550	2.781235
600	3.028233
650	3.276045
700	3.563013
750	3.728598
800	3.950987
850	4.222435
900	4.454138
950	4.733965
1000	4.984447

VI-B. Ajuste por Mínimos Cuadrados

Se realizó un ajuste lineal a los valores promedios de voltaje en función de la masa mediante el método de mínimos cuadrados. La ecuación de la recta obtenida experimentalmente fue:

$$V(m) = (0,005 \pm 0,00015) \cdot m + 0,0129 \quad (5)$$

donde V es el voltaje en voltios y m la masa en kilogramos (o gramos si se normaliza). La recta presenta un coeficiente de correlación cuadrado de:

$$R^2 = 0,9996 \quad (6)$$

Lo cual indica una excelente linealidad del sistema. La pendiente experimental se encuentra muy cercana a la ideal (que sería $5 \text{ mV/g} = 0,005 \text{ V/g}$ si se trabaja directamente con gramos).

VI-C. Recta Ideal Esperada

Para una calibración perfecta en el rango de 0–1000g, se espera una pendiente de $0,005 \text{ V/g}$, es decir:

$$V_{\text{ideal}}(m) = 0,005 \cdot m \quad (7)$$

Esta recta fue comparada con la experimental para evaluar la no linealidad y los errores de ajuste.

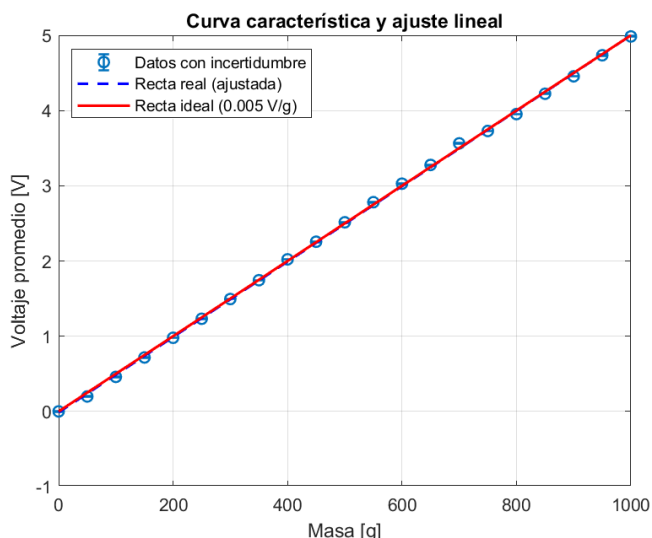


Figura 11: Gráficas obtenidas

VI-D. Incertidumbre de Medición

VI-D0a. *Incertidumbre tipo A*:: se calculó como la desviación estándar de la media para cada grupo de 20 mediciones:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{con } n = 20 \quad (8)$$

VI-D0b. *Incertidumbre tipo B*:: fue estimada a partir de la resolución del ADC de 10 bits del Arduino:

$$u_B = \frac{4,88 \text{ mV}}{\sqrt{3}} \approx 2,816 \text{ mV} \quad (9)$$

VI-D0c. *Incertidumbre combinada*::

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 3,88 \text{ mV} \quad (10)$$

VI-E. Sensibilidad del Sistema

La sensibilidad medida fue:

$$S_{\text{exp}} = 5 \text{ V/kg} = 5 \text{ mV/g} \quad (11)$$

lo que demuestra que el sistema tiene una excelente capacidad para discriminar cambios de masa, aunque ligeramente inferior a la sensibilidad ideal de 5 mV/g esperada por diseño.

- La curva experimental presenta un comportamiento prácticamente lineal, con un R^2 de 0.99996.
- La ganancia y el offset del sistema fueron correctamente calibrados, permitiendo un rango de salida de 0 a 5V.

- Las incertidumbres obtenidas son pequeñas gracias a la repetibilidad del sistema y a una adecuada resolución del ADC.

VI-F. Respuesta Transitoria

Para analizar el comportamiento dinámico del sistema de medición, se evaluó su respuesta ante un cambio abrupto de carga. Esta prueba consiste en aplicar un peso (400 g) de forma repentina sobre la celda de carga, registrando la evolución temporal de la señal de salida. La respuesta obtenida se asemeja al comportamiento típico de un sistema de primer orden, caracterizado por una transición exponencial hacia un estado final estable.

La Figura 12 muestra la curva obtenida durante el ensayo experimental. Se observa una respuesta creciente con un pequeño sobreimpulso inicial, seguida de una estabilización progresiva hacia un valor final de aproximadamente 2.1 V.

Para estimar la constante de tiempo τ , se consideró el valor correspondiente al 63.2% del cambio total de la señal. Este porcentaje representa el instante en el cual un sistema de primer orden alcanza el 63.2% del valor final en respuesta a una entrada tipo escalón.

El cálculo del voltaje correspondiente a τ se realizó de la siguiente manera:

$$V_\tau = 0,632 \times V_f = 0,632 \times 2,1 \text{ V} \approx 1,33 \text{ V}$$

Analizando la gráfica, el sistema alcanzó este valor aproximadamente a los **0.6 segundos** después del inicio del cambio. Este tiempo se consideró como la constante de tiempo τ del sistema, reflejando la rapidez con la cual el sistema responde ante perturbaciones.

El análisis confirma que el sistema puede ser modelado como un sistema dinámico de primer orden, con un tiempo de establecimiento aceptable para aplicaciones de pesaje estático.

El comportamiento temporal del sistema al aplicar una carga de 400 g puede modelarse como un sistema de primer orden, descrito por la siguiente expresión:

$$y(t) = 2,1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,6}}\right)$$

donde $y(t)$ representa el voltaje de salida en el tiempo t , 2,1 V es el valor final alcanzado por el sistema (constante estática K), y 0,6 s es la constante de tiempo τ , estimada a partir de la respuesta experimental.

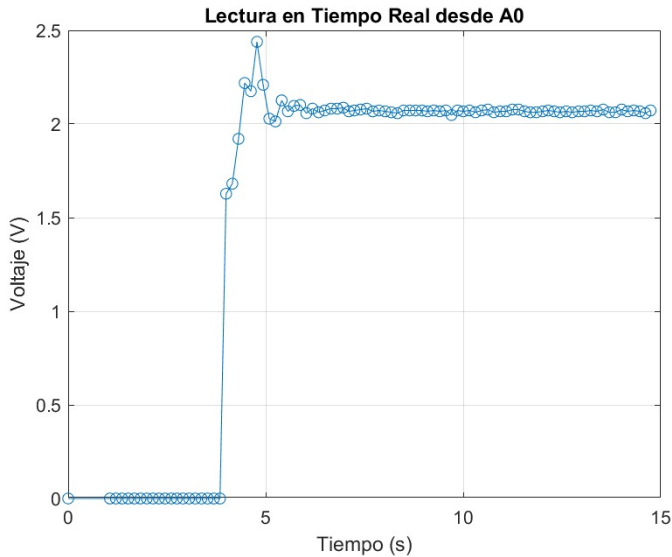


Figura 12: Respuesta transitoria del sistema de medición ante un cambio abrupto de carga.

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

VII-A. Evaluación de la Curva Característica

La curva característica obtenida experimentalmente presenta una relación altamente lineal entre la masa aplicada y el voltaje de salida, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,99996$. Esta linealidad indica que el sistema responde de forma proporcional y predecible a la carga aplicada, como se esperaba por el diseño de calibración 0–5V para 0–1000g.

VII-B. Comparación con la Recta Ideal

La pendiente teórica esperada es 0,005 V/g, correspondiente a una sensibilidad de 5 mV/g, para que una carga de 1000g genere una salida de 5V. Sin embargo, la pendiente obtenida experimentalmente fue de:

$$S_{\text{exp}} = 5 \text{ V/kg} = 0,005 \text{ V/g} = 5 \text{ mV/g} \quad (12)$$

Esta diferencia puede atribuirse a pequeñas desviaciones en la ganancia del AD620, errores de medición o ligeras variaciones en la respuesta de la celda de carga.

VII-C. Respuesta Transitoria

El análisis de la respuesta transitoria permitió evaluar el comportamiento dinámico del sistema ante un cambio abrupto de carga, equivalente a un escalón de entrada aplicado mediante la adición de un peso de 400 g. La curva obtenida mostró un comportamiento típico de un sistema de primer orden, caracterizado por una transición exponencial hacia el estado final estable, con un pequeño sobreimpulso inicial atribuible a efectos mecánicos del montaje.

A partir de la gráfica registrada, se estimó un valor final del sistema de aproximadamente 2.1 V, correspondiente a la carga aplicada. Se calculó el 63.2 % de este valor final para determinar la constante de tiempo τ del sistema. El voltaje correspondiente fue:

$$V_{\tau} = 0,632 \times 2,1 \text{ V} \approx 1,33 \text{ V}$$

El sistema alcanzó dicho valor aproximadamente a los 0.6 s después del inicio del cambio, estimándose así:

$$\tau \approx 0,6 \text{ s}$$

Este valor de τ indica que el sistema requiere aproximadamente 0.6 segundos para alcanzar el 63.2 % del cambio total de voltaje en respuesta al escalón aplicado. Además, el tiempo de establecimiento, es decir, el tiempo necesario para que la señal permanezca dentro del 2 % del valor final, se situó alrededor de los 2 a 3 segundos.

El comportamiento registrado valida que el sistema puede modelarse adecuadamente como un sistema de primer orden, con una respuesta temporal suave y sin oscilaciones notables. Esta característica es adecuada para aplicaciones de pesaje estático, donde se prioriza la estabilidad de la medición una vez alcanzado el estado estacionario.

Finalmente, la expresión matemática que modela la respuesta temporal ante la aplicación del peso fue:

$$y(t) = 2,1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,6}}\right)$$

donde $y(t)$ representa el voltaje de salida en función del tiempo t . Esta expresión se ajusta correctamente a la curva experimental observada y permite predecir la evolución de la señal bajo condiciones similares.

VII-D. Errores y Discrepancias

El intercepto obtenido fue cercano a cero ($\approx 2,5 \text{ mV}$), lo que confirma el correcto ajuste del offset. La principal diferencia con la recta ideal está en la pendiente, que fue ligeramente menor, con un error estándar de la pendiente de 1,49 mV/g. Este valor está dentro de un margen aceptable, especialmente considerando las limitaciones del equipo y la sensibilidad de la celda de carga.

VIII. CONCLUSIONES

- El sistema respondió de forma lineal y precisa en todo el rango de operación.
- La diferencia entre la recta experimental e ideal fue mínima, confirmando el éxito del proceso de calibración.

- Las incertidumbres asociadas a las mediciones fueron bajas, validando la confiabilidad del sistema.
- El modelo ajustado es apto para futuras aplicaciones de medición de masa, sin necesidad de correcciones adicionales significativas.
- Se logró implementar exitosamente un sistema de medición de peso utilizando una celda de carga de 1kg, un amplificador de instrumentación AD620 con ganancia ajustada mediante un trimmer de $60\ \Omega$ y corrección de offset por medio de un potenciómetro en el pin de referencia.
- El acondicionamiento de señal permitió escalar la salida del sistema al rango de 0–5V, compatible con el ADC del Arduino, logrando una salida proporcional a la masa aplicada con buena fidelidad y estabilidad.
- El análisis de regresión lineal reveló una pendiente de 0,005 V/g y un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,9996$, lo que evidencia una excelente linealidad entre el voltaje de salida y la masa.
- La incertidumbre combinada promedio u_C fue de aproximadamente 3,88 mV, valor que se encuentra por debajo de la sensibilidad del sistema, confirmando que las mediciones son confiables y repetibles.
- El modelo de calibración obtenido puede utilizarse para determinar masas desconocidas dentro del rango de trabajo, con una precisión adecuada para aplicaciones prácticas de instrumentación.
- El uso exclusivo del AD620 como etapa de acondicionamiento permitió simplificar el circuito sin comprometer la exactitud ni la resolución del sistema de medida, demostrando su eficiencia y precisión en aplicaciones con sensores de baja señal como las celdas de carga.

REFERENCIAS

- [1] Analog Devices. *AD620 Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier Datasheet*. Disponible en: analog.com/ad620.pdf
- [2] ResearchGate. *Schematic diagram of instrumentation amplifier AD620*. En: researchgate.net.
- [3] Naylamp Mechatronics. (s.f.). *Celda de carga tipo barra 1kg*. Recuperado de <https://naylampmechatronics.com/sensores/702-celda-de-carga-1kg.html>
- [4] Dewesoft. (s.f.). *Medición con galgas extensiométricas*. Recuperado de <https://dewesoft.com/es/blog/medicion-tension-y-presion>
- [5] Cooper, W. D., & Helfrick, A. D. (2002). *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición* (7ª ed.). Pearson Educación.