

Diseño e instrumentación de un Dinamómetro digital para carga axial mediante galgas extensiométricas

Andrés Mauricio Avilán Herrera

Facultad de Ingeniería

Depto. de Ing. Mecánica y Mecatrónica

Universidad Nacional de Colombia

Bogotá D.C., Colombia

amavilan@unal.edu.co

Kennet Jared Cruz Machuca

Facultad de Ingeniería

Depto. de Ing. Mecánica y Mecatrónica

Universidad Nacional de Colombia

Bogotá D.C., Colombia

kcruzm@unal.edu.co

Abstract—Este documento presenta el diseño, construcción y validación de un sistema de medición de fuerza axial de bajo costo basado en galgas extensiométricas. El sistema utiliza dos galgas OMEGA SGD-10/120-LY11 en configuración de medio puente de Wheatstone, acondicionadas mediante un convertidor analógico-digital de 24 bits (ADS1232) y procesadas por un microcontrolador ESP32. La validación experimental se realizó en una máquina universal de ensayos Shimadzu, obteniendo curvas de calibración que relacionan la respuesta eléctrica digital con la carga aplicada. El dispositivo permite la monitorización remota de fuerzas de tensión y compresión, ofreciendo una alternativa accesible para aplicaciones de instrumentación académica e industrial.

Index Terms—Dinamómetro, Galgas extensiométricas, ESP32, ADS1232, Instrumentación, Calibración.

I. INTRODUCCIÓN

La medición precisa de fuerzas axiales es fundamental en la caracterización de materiales y el monitoreo de maquinaria y aplicaciones industriales. Aunque las celdas de carga comerciales ofrecen alta precisión, su integración en sistemas personalizados o educativos a menudo requiere soluciones flexibles y de bajo costo.

Este proyecto aborda el desarrollo de un transductor de fuerza personalizado utilizando galgas extensiométricas de comportamiento lineal (SGD-10/120-LY11). A diferencia de las soluciones comerciales de difícil acceso, este diseño implementa una arquitectura abierta basada en el microcontrolador ESP32, permitiendo no solo la adquisición de datos mediante el ADC ADS1232, sino también la transmisión inalámbrica de datos (IoT).

El objetivo principal es validar la linealidad y precisión del sistema comparándolo con un patrón de referencia industrial (máquina Shimadzu), demostrando la viabilidad de construir instrumentos de medida confiables con componentes electrónicos accesibles.

II. DISEÑO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

A. Requerimientos de Diseño

El sistema fue diseñado para medir fuerzas axiales de tensión en aplicaciones tipo *slackline / highline*, donde se requieren altos márgenes de seguridad mecánica, buena repetibilidad y estabilidad frente a variaciones térmicas y de montaje. El rango objetivo de medición se definió entre 0.1 kN y 30 kN, con una resolución suficiente para detectar variaciones del orden de decenas de Newtons.

B. Diseño Mecánico del Elemento Elástico

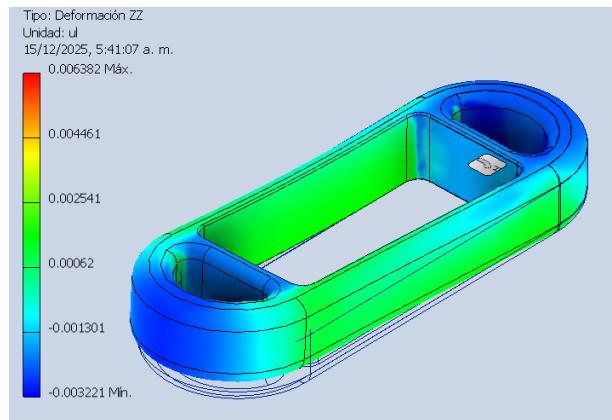


Fig. 1. Geometría de diseño seleccionado

El elemento elástico del dinamómetro fue diseñado para operar bajo cargas axiales de tensión dentro del régimen estrictamente elástico, garantizando repetibilidad, linealidad y seguridad estructural. El material seleccionado fue aluminio serie 7075-T6, debido a su alta resistencia mecánica, bajo peso y estabilidad elástica, con un módulo de Young aproximado de $E = 71 \text{ GPa}$ y un esfuerzo de fluencia superior a 500 MPa.

La sección mínima resistente del elemento se definió como

$$A = 240 \text{ mm}^2,$$

la cual corresponde a la zona instrumentada donde se instalaron las galgas extensiométricas.

1) Cálculo Analítico de Esfuerzos y Deformaciones

Para una carga axial máxima de diseño de $F_{\max} = 30 \text{ kN}$, el esfuerzo normal máximo se estimó mediante

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{A},$$

obteniéndose un valor aproximado de

$$\sigma_{\max} \approx 125 \text{ MPa}.$$

La deformación unitaria axial correspondiente se calculó a partir de la ley de Hooke como

$$\epsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E},$$

resultando en una deformación del orden de

$$\epsilon_{\max} \approx 1.76 \times 10^{-3} (1760 \mu\epsilon).$$

Este nivel de deformación se encuentra dentro del rango óptimo de operación de galgas extensiométricas metálicas convencionales, permitiendo una adecuada sensibilidad sin riesgo de daño permanente ni pérdida de linealidad.

2) Factor de Seguridad

El factor de seguridad frente a fluencia se estimó como

$$FS = \frac{\sigma_{\text{fluencia}}}{\sigma_{\max}},$$

obteniéndose un valor superior a

$$FS > 4,$$

lo cual resulta adecuado para aplicaciones de medición en sistemas sometidos a cargas variables y repetitivas, como en aplicaciones tipo *slackline* y ensayos experimentales.

3) Validación mediante Análisis por Elementos Finitos

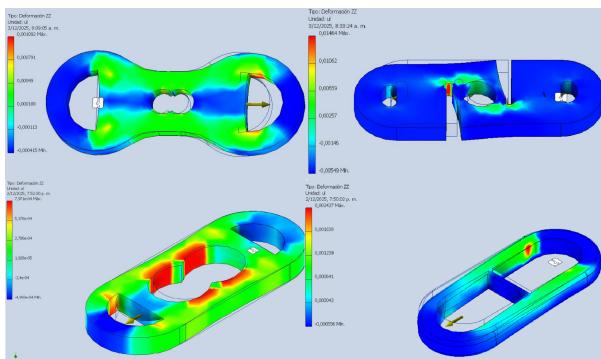


Fig. 2. Validacion mediante FEA

Se evaluaron múltiples geometrías del elemento elástico mediante análisis por elementos finitos (FEA), con el objetivo de estudiar la distribución de esfuerzos y deformaciones bajo carga axial. Aunque algunas configuraciones presentaron mayores concentraciones locales de deformación, estas geometrías

reducían el margen de seguridad estructural y generaban regiones altamente sensibles a errores de posicionamiento de las galgas.

El diseño finalmente seleccionado prioriza una distribución de deformación más uniforme a lo largo del brazo instrumentado, facilitando la instalación reproducible de las galgas y reduciendo la sensibilidad a desalineaciones y efectos de borde. Esta geometría presentó un compromiso óptimo entre sensibilidad, robustez mecánica y repetibilidad metrológica.

C. Selección y Configuración de Galgas Extensiométricas

Se emplearon dos galgas lineales OMEGA SGD-10/120-LY11, de resistencia nominal $R_0 = 120 \Omega$ y factor de galga $GF \approx 2.0$, instaladas en configuración de medio puente de Wheatstone. Esta configuración incrementa la sensibilidad respecto a una galga simple y permite una compensación parcial de los efectos térmicos.

La variación de resistencia de cada galga se modela como

$$\Delta R = R_0 GF \epsilon,$$

y la salida diferencial del medio puente se aproxima por

$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{exc}}} \approx \frac{GF \epsilon}{2}.$$

D. Modelo Eléctrico del Puente

Con una tensión de excitación V_{exc} , la señal de salida del puente se encuentra en el orden de los microvoltios a milivoltios para el rango completo de carga, lo que impone requisitos estrictos sobre el sistema de adquisición.

E. Selección del Convertidor Analógico-Digital

Para la digitalización de la señal se seleccionó el ADC ADS1232 de Texas Instruments, un convertidor de 24 bits con amplificador de ganancia programable (PGA) integrado, diseñado específicamente para sensores de puente resistivo.

La resolución mínima teórica del ADC viene dada por

$$\text{LSB} = \frac{V_{\text{FS}}}{2^{23}},$$

donde V_{FS} es el rango de entrada a la ganancia seleccionada. Aun considerando ruido y no idealidades, la resolución efectiva resultante es suficiente para discriminar las variaciones de deformación producidas por incrementos de carga significativamente menores al rango máximo, validando la selección del ADS1232 para esta aplicación.

La combinación del diseño mecánico, la configuración del puente y la resolución del ADC garantiza que el sistema pueda medir fuerzas axiales con adecuada sensibilidad y estabilidad.

III. DISEÑO ELÉCTRÓNICO

A. Implementación Computacional

Para validar el diseño antes de la implementación física, se realizó una simulación computacional utilizando MATLAB/Python. El procedimiento consistió en:

- Iterar la carga aplicada F desde 0.5 kN hasta 5.0 kN.
- Resolver las ecuaciones gobernantes para cada paso de carga.
- Graficar las curvas de respuesta teórica para Defor-mación, Voltaje del Puente y Salida del ADC.

Las curvas de caracterización resultantes se presentan en la Figura 5.

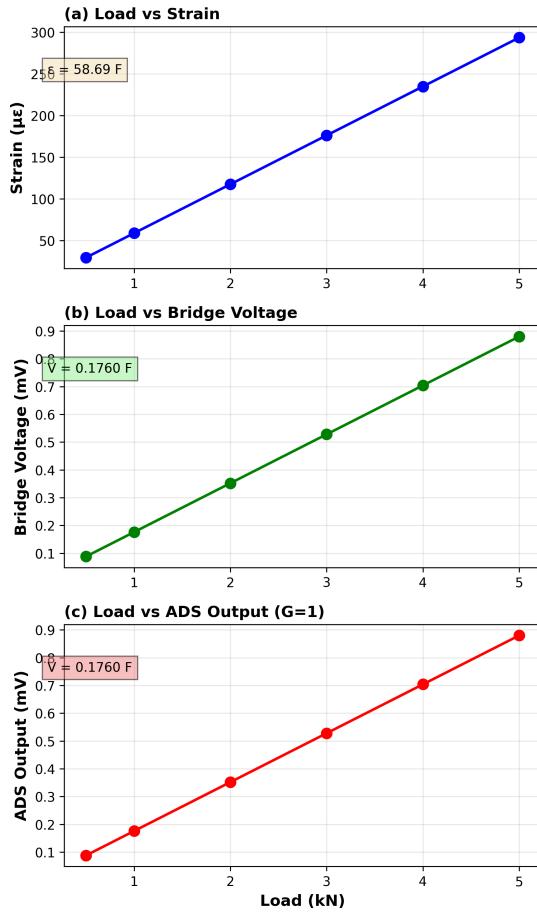


Fig. 3. Caracterización teórica del dinamómetro (Ganancia 1). Las gráficas muestran una linealidad perfecta ($R^2 = 1.0$) a través de las tres etapas de transducción: Deformación Mecánica, Voltaje del Puente y Salida Final.

Como se observa en las gráficas, el sistema exhibe una respuesta perfectamente lineal. Sin embargo, debido a la configuración de Ganancia Unitaria ($G = 1$), el voltaje de salida máximo a 5 kN es de aproximadamente 0.88 mV, lo cual confirma la necesidad de una etapa de filtrado de ruido altamente efectiva en la implementación física.

Luego, se desarrolló un modelo teórico de la cadena completa Fuerza–Deformación–Señal eléctrica, este modelo se imple-

mentó en Simulink encadenando bloques que representan: la fuerza aplicada, la ley de Hooke, la ecuación de la galga, el puente de Wheatstone y un amplificador operacional obteniendo así una estimación teórica del comportamiento de las galgas.

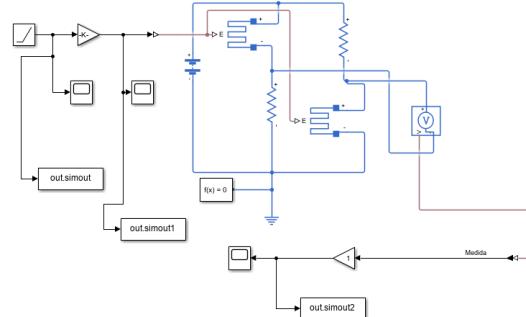


Fig. 4. Diagrama del sistema realizado en SimuLink

Al realizar la simulación se obtienen las gráficas a partir de la visualización de los scopes y de los datos exportados al workspace como se ve a continuación:

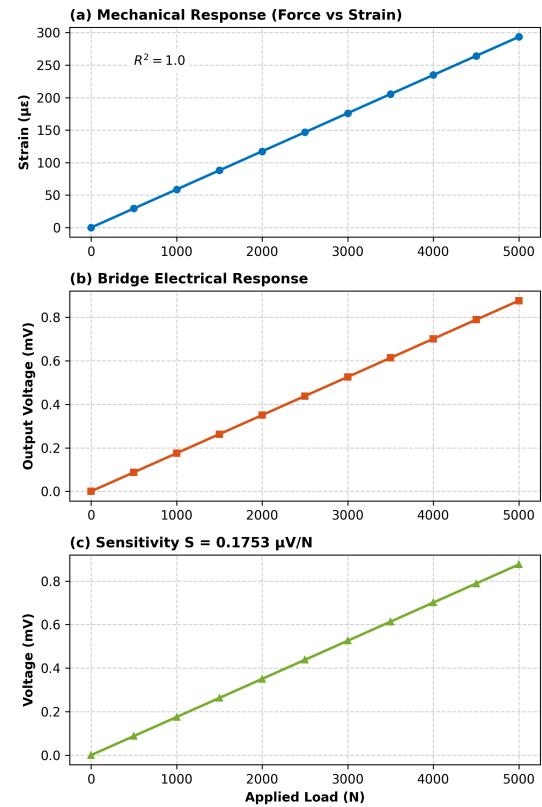


Fig. 5. Gráficas obtenidas a partir de la simulación

B. Acondicionamiento de Señal

El acondicionamiento de la señal proveniente del puente extensiométrico requiere un análisis detallado del ancho de banda efectivo del sistema de adquisición, con el fin de garantizar

estabilidad, rechazo de ruido y correcta reconstrucción de la señal de interés.

El convertidor analógico-digital seleccionado, **ADS1232**, incorpora un modulador $\Sigma-\Delta$ de segundo orden y un filtro digital de decimación interno. De acuerdo con la hoja de datos del fabricante, el ancho de banda efectivo del sistema se aproxima como

$$BW_{ADS} \approx 0.26 \cdot SPS \quad (1)$$

donde SPS corresponde a la tasa de muestreo configurada.

Para la configuración utilizada en este proyecto ($SPS = 10 \text{ Hz}$), el ancho de banda efectivo resulta

$$BW_{ADS} \approx 2.6 \text{ Hz} \quad (2)$$

La Figura 6 presenta un diagrama simplificado de la arquitectura interna del ADS1232, destacando el amplificador de ganancia programable (PGA), el modulador $\Sigma-\Delta$ y el bloque de filtrado digital.

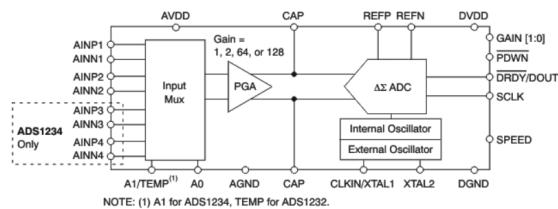


Fig. 6. Arquitectura simplificada del ADS1232

1) Simulación Ideal del Puente Extensiométrico

Inicialmente se realizó una simulación ideal del puente extensiométrico mediante análisis de punto de operación (.op) en LTspice, parametrizando la carga aplicada en valores discretos de masa (kg). En esta condición ideal, la salida diferencial del puente presenta una relación estrictamente lineal con la carga aplicada, como se muestra en la Figura 7.

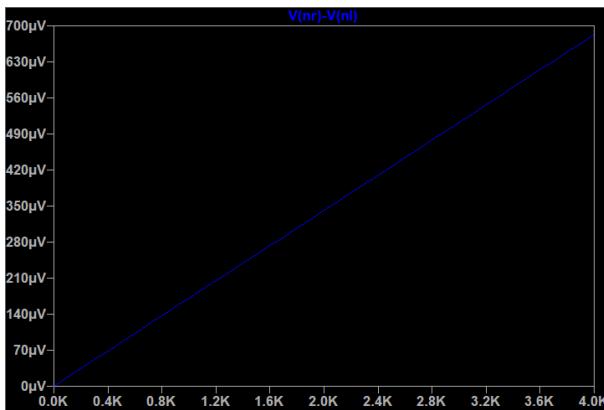


Fig. 7. Respuesta ideal del puente extensiométrico (simulación .op)

Este resultado confirma la linealidad teórica del sistema fuerza-deformación-señal eléctrica. Sin embargo, este escenario no representa el comportamiento real del sistema, donde están presentes perturbaciones eléctricas y mecánicas.

2) Necesidad de Filtrado Analógico

Al introducir fuentes de ruido diferencial en la simulación transitoria (.tran), se observa una superposición de señales de ruido sobre la salida diferencial del puente, degradando la estabilidad de la medición. Aunque el filtrado digital del ADS1232 atenúa estas perturbaciones, resulta necesario implementar un filtrado analógico previo que limite el ancho de banda de la señal de entrada al PGA. Para este propósito se diseñó un filtro RC diferencial de primer orden en las entradas del ADC, como se muestra en la siguiente figura.

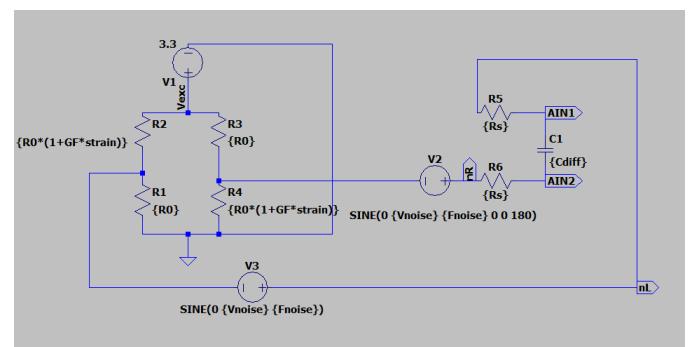


Fig. 8. Filtro RC diferencial en la entrada del ADS1232

3) Diseño del Filtro RC Diferencial

El filtro está compuesto por dos resistencias serie R_s y un capacitor diferencial C_{diff} , cuya frecuencia de corte se define como

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_s C_{\text{diff}}} \quad (3)$$

Con el objetivo de atenuar perturbaciones por encima del ancho de banda útil y preservar la señal de interés, se seleccionó una frecuencia de corte cercana a 15 Hz. Para ello se adoptaron los valores:

$$R_s = 1 \text{ k}\Omega \quad (4)$$

$$C_{\text{diff}} = 10 \mu\text{F} \quad (5)$$

Estos valores producen una atenuación significativa de componentes por encima de 50 Hz, sin introducir distorsión apreciable en la banda de interés.

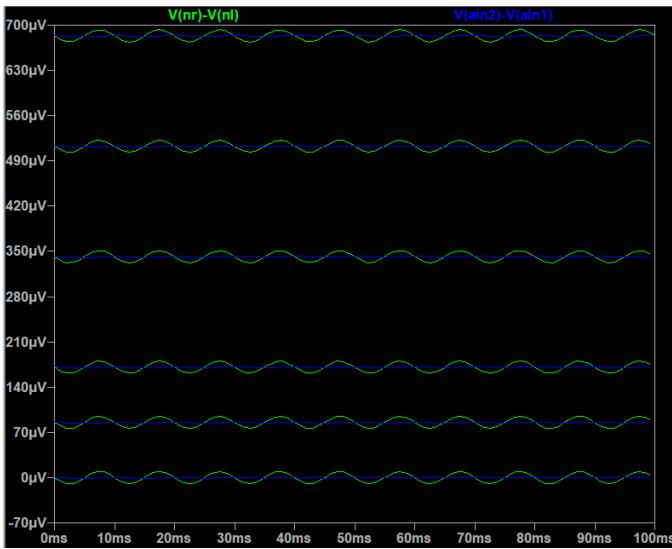


Fig. 9. Comparación entre la señal diferencial del puente extensométrico y la señal diferencial en las entradas AIN del sistema de adquisición

C. Adquisición y Procesamiento

El ADS1232 es un convertidor analógico-digital $\Sigma-\Delta$ diferencial de 24 bits diseñado para la lectura directa de puentes resistivos. En este trabajo, el dispositivo se utilizó para adquirir la tensión diferencial generada por un puente extensiométrico sometido a carga mecánica.

El convertidor no mide fuerza ni voltaje absoluto, sino la diferencia de potencial entre las entradas AIN+ y AIN-. Dicha diferencia se define como

$$V_{\text{IN}} = V_{\text{AIN+}} - V_{\text{AIN-}}, \quad (6)$$

la cual es escalada internamente por la ganancia programada (PGA) antes del proceso de cuantificación.

Lectura digital (raw)

El valor digital leído desde el ADS1232, denominado raw , corresponde a un entero con signo representado en complemento a dos y codificado en 24 bits efectivos. Este valor es proporcional a la fracción del rango de entrada del ADC y se expresa matemáticamente como

$$\text{raw} = \left(\frac{V_{\text{IN}}}{V_{\text{FS}}} \right) 2^{23}, \quad (7)$$

donde V_{FS} representa el rango de voltaje diferencial de plena escala del convertidor.

El uso del factor 2^{23} se debe a que uno de los 24 bits disponibles está reservado para el signo. En consecuencia, el rango digital del dispositivo está comprendido entre -2^{23} y $2^{23} - 1$, siendo 0 el valor asociado a una entrada diferencial nula.

Rango de voltaje y resolución

El rango de entrada del ADS1232 depende de la tensión de referencia y de la ganancia interna seleccionada. En este

trabajo se utilizó una tensión de referencia $V_{\text{REF}} = 3.3 \text{ V}$ y una ganancia PGA igual a 1, por lo que el rango diferencial de entrada fue

$$V_{\text{FS}} = \pm 3.3 \text{ V}. \quad (8)$$

Bajo esta configuración, el tamaño del bit menos significativo (LSB) viene dado por

$$\text{LSB} = \frac{V_{\text{FS}}}{2^{23}}, \quad (9)$$

lo que corresponde a una resolución aproximada de

$$\text{LSB} \approx 0.393 \mu\text{V}. \quad (10)$$

En consecuencia, cada incremento unitario en el valor raw representa una variación de aproximadamente $0.39 \mu\text{V}$ en la entrada diferencial del ADC.

Proceso de adquisición digital

La lectura del dato se realizó siguiendo el protocolo especificado en el datasheet del ADS1232. El sistema esperó a que la línea de datos (DOUT) indicara disponibilidad de conversión, tras lo cual se leyeron secuencialmente 24 bits, correspondientes al código digital de la conversión. Posteriormente, se aplicó un pulso adicional de reloj para finalizar la transferencia.

Dado que el microcontrolador emplea variables de 32 bits con signo, fue necesario realizar una extensión de signo para interpretar correctamente los valores negativos, garantizando la coherencia del dato leído con el formato de complemento a dos del ADC.

Comportamiento del cero

Durante las pruebas experimentales se observó que, en ausencia de carga, el valor raw no era exactamente nulo. Este comportamiento se atribuye a desbalances inherentes del puente extensiométrico, offsets internos del convertidor, efectos térmicos y ruido de baja frecuencia. Por esta razón, se realizó un procedimiento de tara, consistente en calcular el promedio de múltiples muestras sin carga y restarlo posteriormente a las mediciones adquiridas bajo carga.

Consistencia experimental

Las variaciones observadas en el valor raw al aplicar cargas crecientes mostraron una relación aproximadamente lineal con la fuerza aplicada. Por ejemplo, una variación de aproximadamente 600 cuentas digitales correspondió a un incremento de tensión diferencial del orden de $236 \mu\text{V}$, valor coherente con el nivel de deformación esperado en el elemento instrumentado y con el modelo teórico del puente extensiométrico.

Selección de la ganancia

La configuración con ganancia PGA = 1 proporcionó una mayor estabilidad del cero y una menor sensibilidad al ruido, evitando la saturación del convertidor. Aunque esta elección

reduce la resolución teórica del sistema, se obtuvo una resolución efectiva suficiente para el rango de cargas analizado, resultando adecuada para el ensayo experimental realizado.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CALIBRACIÓN

A. Descripción del Ensayo

Para la caracterización del dinamómetro, se realizaron mediciones de carga tanto en el proceso de carga como en el proceso de descarga. Se tomaron 6 valores durante la subida de la carga y 5 valores durante la bajada. Los puntos de medición fueron los siguientes:

Carga (N): 0, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 3000, 2000, 1000, 500, 0

El objetivo de este procedimiento fue obtener una curva de calibración precisa para correlacionar la lectura en *counts* con las cargas aplicadas, considerando tanto la subida como la bajada de carga para identificar posibles histeresis y asegurar la fiabilidad de las mediciones.

El prototipo se observa a continuación con la configuración del montaje:



Fig. 10. Prototipo experimental del dinamómetro digital. Se observa el elemento elástico instrumentado conectado al sistema de adquisición de datos.

B. Datos Experimentales

A continuación se presentan los datos experimentales obtenidos durante las pruebas de carga:

Load _N	N samples	Mean (Raw)	Std (Raw)
0	27	-24.37	14.535
500	30	485.1	10.193
1000	30	949.23	16.016
2000	30	1769	16.702
3000	30	2640.9	20.299
4000	30	3489.2	22.521

C. Sensibilidad por Segmento

La sensibilidad de los diferentes segmentos de carga es la siguiente:

Segment	Counts per N	N per count
0 – 500	1.0189	0.98141
500 – 1000	0.92827	1.0773
1000 – 2000	0.81973	1.2199
2000 – 3000	0.87197	1.1468
3000 – 4000	0.8483	1.1788

D. Precisión

Las desviaciones estándar convertidas en Newtons para cada carga son las siguientes:

Load _N	Std (counts)	Std (N)
0	14.535	14.265
500	10.193	10.98
1000	16.016	19.538
2000	16.702	19.155
3000	20.299	23.929
4000	22.521	26.548

E. Calibración Global

La ecuación de calibración global obtenida es:

$$\text{Counts} = 0.868929 \cdot N + 30.890$$

$$R^2 = 0.999309$$

F. Gráficas de Resultados

A continuación se presentan las gráficas generadas a partir de los datos experimentales y la calibración:

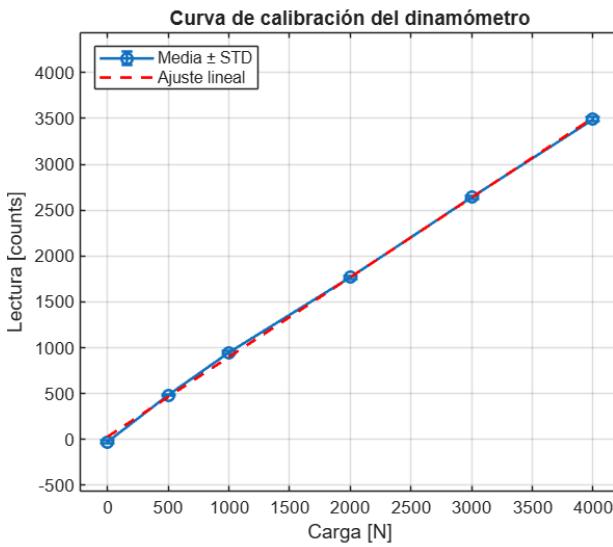


Fig. 11. Curva de calibración del dinamómetro: Media ± STD con ajuste lineal.

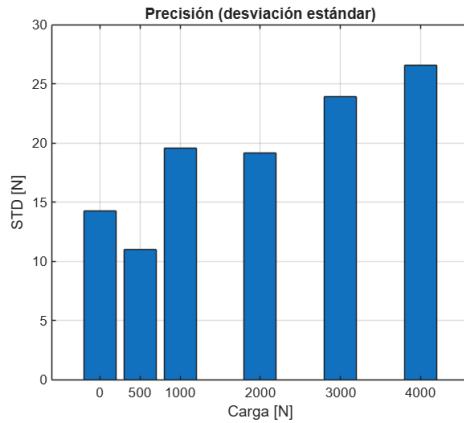


Fig. 12. Precisión (desviación estándar) en función de la carga.

La siguiente gráfica resume las mediciones obtenidas durante el ciclo de prueba con el multímetro:

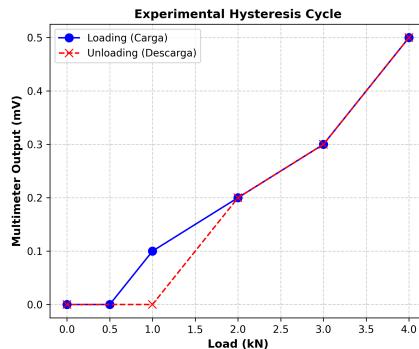


Fig. 13. Curva de Histéresis Experimental tomada con multímetro. La superposición entre los puntos de carga (azul) y descarga (rojo) demuestra la ausencia de histéresis mecánica significativa.

Los resultados experimentales muestran una salida máxima de 0.5 mV a 4 kN, lo que corresponde a una sensibilidad aproximada de 0.125 mV/kN. Este valor es ligeramente inferior a la predicción teórica (0.176 mV/kN), probablemente debido a pérdidas resistivas en el cableado o alineaciones menores en la instalación de las galgas.

Sin embargo, el sistema exhibe una buena reversibilidad, con valores idénticos durante las fases de carga y descarga (histéresis ≈ 0), confirmando el comportamiento elástico del elemento de aluminio y la fiabilidad del proceso de pegado.

G. Capacidad IoT y Monitoreo Remoto

El sistema fue equipado con conectividad WiFi mediante el ESP32, permitiendo la transmisión en tiempo real de mediciones hacia la plataforma Blynk. Esto facilita el monitoreo remoto, el registro histórico de datos y la integración futura con sistemas de automatización industrial.

V. CONCLUSIONES

Se diseñó, construyó y validó un dinamómetro digital de bajo costo para medición de carga axial, integrando un elemento elástico de aluminio 7075-T6 instrumentado con galgas extensiométricas en configuración de medio puente diagonal.

El análisis experimental demostró una buena linealidad en la respuesta del sistema, en el rango de 1 a 4 kN, validando el diseño mecánico y la selección del material dentro de su zona elástica. La ausencia de histéresis apreciable en las mediciones directas de voltaje confirma la calidad de la adhesión de las galgas y la estabilidad mecánica del transductor.

Sin embargo, se observó una discrepancia en la sensibilidad del sistema. Mientras el modelo teórico predijo una sensibilidad de 0.176 mV/kN, las mediciones experimentales arrojaron un valor aproximado de 0.125 mV/kN. Esta atenuación del 29% se atribuye principalmente a pérdidas resistivas en el cableado de interconexión y al efecto de carga del circuito de acondicionamiento sobre la alta impedancia de salida del puente.

La implementación con el ADC ADS1232 en configuración de ganancia unitaria ($G = 1$) permitió una adquisición estable con una resolución efectiva adecuada para la aplicación. No obstante, para futuras iteraciones se recomienda implementar una etapa de pre-amplificación de instrumentación con bajo ruido o configurar la ganancia interna del ADC en $G = 64$, lo cual permitiría aprovechar mejor el rango del convertidor y aumentar la resolución efectiva del sistema.

REFERENCES

- [1] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf, and D. F. Mazurek, *Mechanics of Materials*, 6th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2012.
- [2] Texas Instruments, “ADS1232/ADS1234: 24-Bit, 80SPS, 2-Ch (Differential), Pin-Programmable Delta-Sigma ADC for Bridge Sensors,” SBAS350F Datasheet, Oct. 2004 [Revised Feb. 2008].
- [3] OMEGA Engineering, “Linear Strain Gauges: SGD Series,” Technical Reference SGD-10/120-LY11, Norwalk, CT, USA, 2024.

- [4] K. B. Klaassen, *Electronic Measurement and Instrumentation*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1996, pp. 145–170.
- [5] ASTM International, “Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Drawn Seamless Tubes,” ASTM B210, West Conshohocken, PA, 2019.
- [6] R. Pallás-Areny and J. G. Webster, *Sensors and Signal Conditioning*, 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2001.