

Análisis de esfuerzos mecánicos utilizando galgas extensiométricas

1st Jonathan Daniel González Quevedo

Centro Universitario de Los Lagos,
Universidad de Guadalajara,
Lagos de Moreno, Jalisco, México
jonathan.gonzalez3750@alumnos.udg.mx

4th Francisco J. Casillas-Rodríguez
Centro Universitario de Los Lagos,
Universidad de Guadalajara,
Lagos de Moreno, Jalisco, México
francisco.casillas@academicos.udg.mx

2nd Ernesto J. Ruiz-Ortega

Centro Universitario de Los Lagos,
Universidad de Guadalajara,
Lagos de Moreno, Jalisco, México
ernesto.ruiz8257@alumnos.udg.mx

5th Miguel Mora-González

Centro Universitario de Los Lagos,
Universidad de Guadalajara,
Lagos de Moreno, Jalisco, México
miguel.mora@academicos.udg.mx

3rd Francisco G. Peña-Lecona

Centro Universitario de Los Lagos,
Universidad de Guadalajara,
Lagos de Moreno, Jalisco, México
franciscog.penal@academicos.udg.mx

Resumen— Este estudio presenta el diseño y la implementación de un sistema de medición de deformaciones, el cual utiliza galgas extensométricas y una celda de carga de 200 N para evaluar el comportamiento mecánico de los materiales bajo carga. Una placa de aluminio rectangular sirve como elemento de prueba, con galgas extensométricas dispuestas en una configuración de medio puente de Wheatstone, para medir con precisión sus deformaciones. Hacemos el uso de un microcontrolador Arduino que funciona como acondicionador de señal, interactuando con un amplificador de señal para procesar y mostrar lecturas de carga en tiempo real en una pantalla de cristal líquido (LCD). Esta configuración ofrece una solución sencilla y rentable para observar la respuesta del material a las fuerzas aplicadas, lo que proporciona información valiosa sobre el comportamiento de la deformación y la distribución de la tensión mecánica. Los resultados demuestran la eficacia de este enfoque para el análisis preciso de la tensión en los materiales, lo que lo convierte en una herramienta versátil para diversas aplicaciones de ingeniería.

Palabras Clave — deformación, celda de carga, esfuerzos mecánicos, compresión y tensión.

I. INTRODUCCIÓN

El descubrimiento de la relación entre la deformación y la resistencia eléctrica por Lord Kelvin en 1856 marcó el comienzo de la medición de la deformación en materiales conductores, sentando las bases para la tecnología de los extensómetros [1]. A principios de la década de 1930, Charles Kearns aplicó extensómetros para monitorear las deformaciones vibratorias en hélices de palas de alto rendimiento. Sin embargo, desafíos como la inestabilidad en los valores de resistencia limitaron la precisión de estos primeros medidores [2].

Los avances en instrumentación llegaron con la invención del puente de Wheatstone por Samuel Hunter Christie en 1832, un sistema mejorado por Charles Wheatstone en 1843 para la medición precisa de la resistencia [3]. El puente de

Wheatstone, con sus cuatro resistencias colocadas estratégicamente, proporciona un medio robusto para detectar tensiones mecánicas a través de la amplificación de la señal eléctrica, lo que permite la detección de la deformación bajo cargas de compresión y tracción [4].

Los desarrollos más recientes en la tecnología de extensómetros han ampliado la precisión y las aplicaciones de estos instrumentos en todos los campos. Por ejemplo, Lin et al. (1997) introdujeron un micro extensómetro con un amplificador mecánico, logrando mediciones de deformación de alta resolución en películas delgadas con una deformación mínima. Su diseño permite el monitoreo en tiempo real de las deformaciones residuales, mejorando la precisión en aplicaciones a microescala [5].

De manera similar, Oluwole et al. (2015) diseñaron y probaron un instrumento de galgas extensométricas basado en una configuración de un cuarto de puente, validando su efectividad a través de comparaciones con valores de deformación teóricos en análisis de tensión en una viga de madera sujeta [6]. En ingeniería civil, la tecnología de galgas extensométricas es vital para determinar el módulo de elasticidad del hormigón. Huang et al. (2010) contrastaron las galgas extensométricas tradicionales con una alternativa óptica, logrando mediciones de deformación no destructivas en tiempo real a través de la correlación de imágenes digitales, que ofrece una confiabilidad mejorada y facilidad de configuración en comparación con los métodos convencionales [7].

Írsel (2021) demostró además la confiabilidad de las galgas extensométricas en el análisis de tensión experimental utilizando una configuración de puente de Wheatstone completo, logrando resultados precisos que se alineaban estrechamente con los datos analíticos y numéricos, validando así la solidez de la tecnología en aplicaciones prácticas [8]. Por último, Sil (2024) exploró la aplicación de galgas extensométricas en la construcción de puentes, particularmente en el monitoreo de la distribución de tensiones en cables de pretensado a través del análisis de elementos finitos. Este trabajo destaca el papel fundamental de las galgas extensométricas para garantizar la integridad

estructural y mejorar la seguridad de los puentes de hormigón pretensado [9].

En este estudio, implementamos galgas extensométricas y una celda de carga de 200 N conectada a un amplificador de señal para interpretar el comportamiento de una placa de aluminio bajo carga. Usando un microcontrolador Arduino como acondicionador de señal, la configuración permite lecturas de deformación en tiempo real, mostradas en una pantalla de cristal líquido (LCD). Las galgas extensométricas están dispuestas en una configuración de medio puente de Wheatstone para medir la deformación en la placa a medida que sufre tensión mecánica. La estructura de este artículo es la siguiente: la Sección II presenta el fundamento teórico de las galgas extensométricas, en la Sección III se propone la metodología así como la configuración experimental, detallando la calibración y disposición de las galgas extensométricas y la celda de carga además de que se analiza los resultados y ofrece un análisis comparativo de las respuestas de deformación observadas y esperadas. Finalmente, la Sección IV proporciona las conclusiones del estudio, resumiendo la efectividad de este enfoque para el análisis preciso de tensiones en materiales.

II. FUNDAMENTO TEÓRICO

Las galgas extensométricas son dispositivos fundamentales que se utilizan para medir la deformación, definida como la deformación de un material en respuesta a una fuerza aplicada (Figura 1).

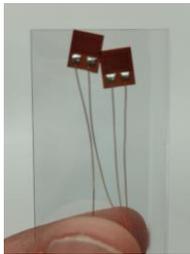


Figura 1. Galga extensométrica uniaxial.

Esta deformación, o deformación (ϵ), se expresa como el cambio relativo en longitud:

$$\epsilon = \Delta L/L, \quad (1)$$

donde L representa la longitud original del material y ΔL es el cambio de longitud después de aplicar tensión. Los extensómetros se basan en el principio de que la resistencia eléctrica de un conductor o semiconductor cambia cuando sufre una deformación mecánica.

Un extensómetro funciona normalmente como un transductor, convirtiendo la tensión mecánica en una señal eléctrica. Esta conversión se logra mediante el circuito de puente de Wheatstone, una configuración de cuatro resistencias dispuestas de una manera específica para medir pequeños cambios de resistencia con alta sensibilidad. La salida del puente de Wheatstone viene dada por:

$$V_m = V_{ext} \cdot \frac{\frac{R_1}{(R_1 + R_2)} - \frac{R_3}{(R_3 + R_4)}}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_3}{R_4}}, \quad (2)$$

En las aplicaciones con galgas extensométricas, todas las resistencias del puente (R_1 , R_2 , R_3 y R_4) están inicialmente equilibradas, lo que produce un voltaje de salida $V_m = 0$ cuando no se aplica tensión. Sin embargo, cuando se introduce tensión mecánica, este equilibrio cambia y genera una señal de salida medible que corresponde a la deformación del material.

A. Galgas extensométricas resistivas y factor de galga

La sensibilidad de una galga extensométrica se define por su factor de galga (GFGF), que cuantifica la relación entre la deformación y el cambio relativo en la resistencia. El factor de galga se expresa como:

$$GF = \frac{\Delta R}{\epsilon R}, \quad (3)$$

donde ΔR es el cambio en la resistencia, R es la resistencia nominal del extensómetro y ϵ es la deformación. El factor de extensómetro es un parámetro crítico que determina la precisión de las mediciones de deformación, con valores típicos para extensómetros metálicos de alrededor de 2,0. Los extensómetros de alta resistencia (como 350Ω en comparación con 120Ω) suelen preferirse debido a su menor generación de calor y su mejor relación señal-ruido, que mejoran la estabilidad de la medición.

B. Configuración del puente de Wheatstone

La configuración del puente de Wheatstone, que se utiliza a menudo con galgas extensométricas, consta de dos ramas paralelas de dos resistencias cada una (Figura 2) [3].

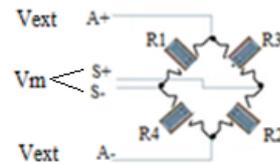


Figura 2. Puente de Wheatstone.

En una configuración de medio puente, dos de las resistencias son galgas extensométricas activas, mientras que las dos restantes son resistencias fijas. Cuando se aplica tensión externa, la resistencia de las galgas activas cambia, lo que produce una salida de tensión desequilibrada a través del puente. La relación entre la tensión de salida V_m en términos de la tensión de excitación del puente V_{ext} y los cambios de resistencia de las galgas extensométricas se deriva de la siguiente manera:

Dado que A_+ y A_- son la alimentación del puente de Wheatstone de la figura 2, se tiene que $A_+ + A_- = V_{ext}$, y el voltaje de salida será igual $V_m = S_+ + S_-$, donde

$$V_{S+} = V_{ext} \left(\frac{R2}{R2 + R1} \right) \quad (4)$$

y

$$V_{S-} = V_{ext} \left(\frac{R4}{R4 + R3} \right). \quad (5)$$

Por lo tanto:

$$V_m = V_{ext} \left[\left(\frac{R2}{R2 + R1} \right) - \left(\frac{R4}{R4 + R3} \right) \right], \quad (6)$$

Esta configuración permite una alta sensibilidad en la detección de pequeños cambios en la tensión, que posteriormente se convierten en señales eléctricas.

C. Configuraciones de rosetas para deformaciones multidireccionales

En campos de tensión complejos, donde la deformación se produce en múltiples direcciones, se emplean rosetas. Una roseta consta de dos o tres medidores de deformación dispuestos para medir la deformación en diferentes orientaciones, lo que permite determinar las tensiones principales. Cuando se desconoce la dirección de la tensión, se suele utilizar una roseta de tres elementos. Las configuraciones de rosetas (como la rectangular de 45° o la delta de 60°) son eficaces para capturar datos de deformación multidireccionales, lo que garantiza una medición precisa de distribuciones de tensión complejas.

D. Sensores resistivos

Las galgas extensométricas son dispositivos delicados y precisos utilizados para medir deformaciones en materiales y estructuras. Son de gran importancia para realizar análisis estructurales y de resistencia de los materiales para poder tener cálculos más precisos en la vida real. Una parte fundamental para garantizar la precisión de las mediciones y la integridad de los datos recolectados por las galgas es el correcto pegado al material a medir. Se entiende por strain o esfuerzo a la cantidad de deformación de un cuerpo debido a la fuerza aplicada sobre él. Si lo ponemos en términos matemáticos, el *strain* ϵ se define como la fracción de cambio en longitud, como se observa en la Figura 3.

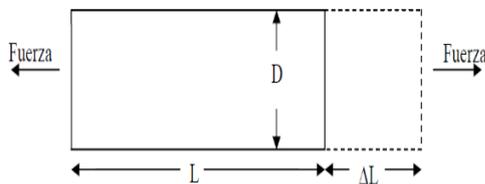


Figura 3. Deformación *strain* (ϵ).

E. Roseta

Dependiendo de las direcciones en la que se requiera medir una la deformación podemos usar combinaciones de dos o tres elementos si es que se conoce la dirección de la fuerza o si no combinaciones de galgas para determinar hacia dónde va la deformación.

Para estados biaxiales de esfuerzos (muy común en el uso de *strain gage*), una roseta de dos o tres elementos puede ser

requerida para determinar los principales esfuerzos. Cuando las direcciones de los esfuerzos se conocen de antemano, una roseta de dos elementos, 90°, puede ser empleada con las direcciones de los ejes alineadas con los esfuerzos. Las direcciones principales de esfuerzos pueden ser determinadas con suficiente precisión por varios métodos. Por ejemplo, la forma de un objeto y el modo en que se carga pueden ser de manera tal que las direcciones principales de esfuerzos resulten obvias por la simetría del problema. Las principales direcciones de esfuerzos pueden ser también definidas por *PhotoStress® testing*.

En la mayoría de los casos de superficies bajo esfuerzos, cuando las direcciones principales de los esfuerzos no son conocidas, una roseta de tres elementos debe ser utilizada. Dicha roseta puede ser ubicada con cualquier orientación, pero usualmente se dispone de manera que una de sus grillas se encuentre alineada con un eje principal de la pieza a probar. Las rosetas de tres elementos se encuentran disponibles en configuraciones rectangulares de 45° tanto como configuraciones Delta de 60°.

F. Resistencia de galgas

Hablando de galgas extensométricas y resistencias de las mismas la única diferencia entre ellas siendo de la misma serie es la resistencia eléctrica (típicamente 120Ω contra 350Ω). Cuando existen estas opciones, la galga con mayor resistencia se utilizan más frecuentemente pues reduce la disipación y la generación de calor en un factor de tres (considerando el mismo voltaje aplicado a esta galga). También se tiene como ventaja a la disminución de ciertos efectos debido a las pistas como la menor sensibilidad del circuito gracias a la resistencia de las pistas tanto como a las variaciones de señal indeseadas a causa de los cambios de resistencia con fluctuaciones de temperatura. Además, cuando las galgas incluyen llaves, bucles o fuentes aleatorias de resistencia variable, la relación señal a ruido se ve mejorada con galgas con resistencia mayor para el mismo nivel de potencia. En análisis experimentales de esfuerzos, una galga de simple grilla se utilizaría si sólo si se conoce de forma que el esfuerzo en el punto de medida es uniaxial y la dirección de dichos esfuerzos es conocido con una precisión razonable. Estos requerimientos limitan seriamente el campo de aplicación de las galgas extensométricas de simple grilla en el análisis de esfuerzos y la no consideración de esfuerzos biaxiales pueden llevar a grandes errores de medición.

G. Selección de una galga extensométrica

En el momento en el necesitamos hacer una medición hay que contemplar la situación del objeto de estudio, así como todos los factores externos que pueden estar involucrados, ya que, en base a ellos tendremos que hacer la selección de la galga. El paso inicial para preparar la instalación de cualquier strain gage es la elección de la galga apropiada para la tarea específica. Puede parecer en principio que dicha tarea es un ejercicio simple, pero en realidad no es así. Una selección racional y cuidadosa de muchos factores, como la duración en el tiempo, el rango de esfuerzo requerido, y la temperatura de operación deben ser considerados para elegir la mejor combinación de strain gage/adhesivo para una prueba determinada.

Durante la instalación y operación de la galga esta se ve afectada por los siguientes parámetros propios de la galga, cada uno puede ser seleccionado en diferente grado.

- Sensibilidad al esfuerzo de la aleación.
- Auto compensación de la temperatura.
- Material de respaldo.
- Resistencia de la grilla.
- Longitud de galga.
- Patrón de galga.

Propiamente para seleccionar el grado de cada uno necesitamos contemplar las condiciones ambientales como las de operación para que nos asegure una mejor medición y satisfaga la instalación junto a los requerimientos necesarios de la medición, estos pueden ser:

- Precisión.
- Durabilidad.
- Estabilidad.
- Temperatura.
- Facilidad de instalación.
- Elongación Resistencia cíclica.
- Resistencia ambiental.

III. METODOLOGÍA Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

A. Colocación de la galga extensiométrica

Una vez seleccionada la galga extensométrica es necesario asegurarse de llevar a cabo una correcta colocación de la galga, ya que un proceso bien ejecutado optimiza la adherencia de la galga y sobre todo asegura que las lecturas de esfuerzo mecánico sean confiables, para ello es necesario contemplar las siguientes etapas en donde de manera general abarca el proceso de colocación correcto:

1. **Preparación de la superficie:** Lijar y desengrasar la superficie para tener una superficie óptima de pegado.
2. **Aplicación del acondicionador y neutralizador:** aplicación del acondicionador y neutralizador secando entre pasos y asegurando que no se depositen impurezas en la superficie.
3. **Colocación de la Galga:** Alinear la galga en el área seleccionada del material, y aplicar el adhesivo.
4. **Presión y limpieza:** Mantener presión sobre la galga al menos un minuto y retirar los excesos.
5. **Protección final:** Aplicar algún barniz y verificar la resistencia con un multímetro.

Nota: Este es un proceso se muestra de una manera muy general, puede contactar el autor de este documento para el reporte técnico donde se profundiza lo antes mencionado.

B. Medición de la señal con Arduino.

Con las galgas colocadas en el dispositivo a medir (especimen), es posible observar los cambios de este elemento sometido a un esfuerzo mecánico tanto en tensión

como en compresión. Esta señal generada pasara por un procesamiento de señales y utilizando un cálculo matemático es posible visualizar estos cambios de esfuerzos mecánicos en los especímenes Figura 4.

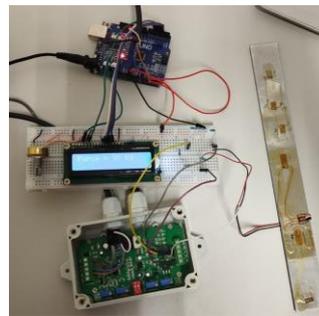


Figura 4. Arreglo de amplificador, Arduino y espécimen.

De igual manera utilizando una celda de carga cullo dispositivo ya tiene el puente de Wheatstone internamente en su configuración, solo es necesario amplificar esta señal y con una correcta calibración es posible medir y evaluar cualquier punto de fuerza en el renglo de calibración de cada celda. Figura 5.

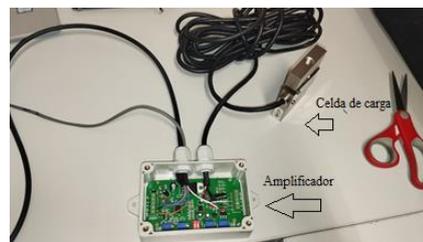


Figura 5. Conexión de amplificador a la celda de carga.

Dentro de la programación del microcontrolador Arduino se implementa una serie de códigos que nos ayuden a la interpretación de los valores leídos Figura 6, luego estos valores se procesan y se convierten a un tipo de señal que se pueda interpretar por quien este analizando las señales, convirtiendo este proceso en algo más amigable y fácil de implementar.

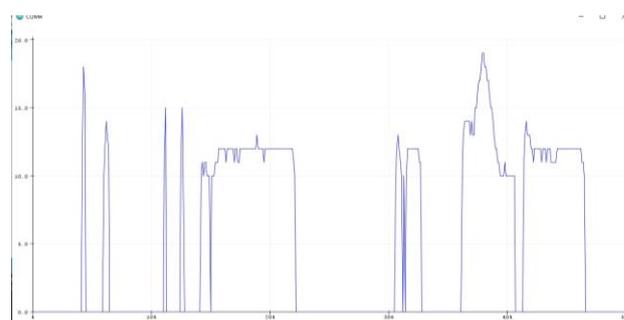


Figura 6. Señales leídas sin procesamiento.

Para poder mostrar estas señales y que sea posible interpretarlas en tiempo real es necesario el uso de un display LCD, con el arreglo de programación mencionado anteriormente será posible ver estos valores.

Para el análisis específico de piezas con galgas colocadas sobre los mismos será necesario convertir los valores de señales obtenidos en base a la deformación aplicada, en cambio para una celda de carga solo será necesario amplificar la señal y realizar una correcta calibración.



Figura 7. Señal de deformación mostrada en el LCD.

IV. CONCLUSIONES

Este estudio demuestra con éxito la viabilidad de un sistema de medición basado en galgas extensométricas, integrado con una celda de carga y un microcontrolador Arduino, para analizar la tensión mecánica en materiales. Al emplear una configuración de medio puente de Wheatstone sobre una placa de aluminio, este sistema logró mediciones de tensión confiables bajo cargas variables, lo que resalta la eficacia de usar componentes electrónicos accesibles para un análisis de tensión preciso. Los resultados subrayan la precisión y eficiencia de este enfoque, que no solo proporciona datos de tensión en tiempo real, sino que también mejora nuestra capacidad para observar la distribución de la tensión en respuesta a las fuerzas aplicadas. Esta configuración rentable, combinada con componentes fáciles de usar, ofrece una solución práctica para evaluar el comportamiento de los materiales bajo tensión mecánica tanto en entornos académicos como industriales. Además, la capacidad de detectar la tensión con alta sensibilidad contribuye a mejorar los diagnósticos en aplicaciones de prueba estructural y de materiales. Este sistema tiene el potencial para usarse en situaciones en donde las respuestas al estrés son crucial, incluida la ingeniería estructural, la fabricación y el control de calidad. El trabajo futuro podría expandir estos hallazgos integrando sensores adicionales o adaptando el sistema para monitorear diferentes tipos de materiales, ampliando así su alcance y aplicabilidad.

En resumen, el sistema de medición de deformación desarrollado es una herramienta valiosa para ingenieros e investigadores, ya que ofrece una comprensión más profunda del comportamiento mecánico y las respuestas a la tensión en los materiales. Este trabajo sienta las bases para futuras innovaciones en el análisis de tensión mecánica accesible y preciso.

REFERENCIAS

- [1] M. Diaz-Rodriguez, N. Scarcella, C. Marmolejo, y R. D. Chacon, "Diseño, construcción y puesta en servicio de una celda de carga con capacidad para 30 toneladas", *Scientia Et Technica*, 2007.
- [2] E. Álzate Rodríguez, J. Montes Ocampo, y C. Silva Ortega, "Medidores de deformacion por resistencia: galgas extensiométricas.", *Scientia et Technica*, vol. 2, núm. 34, 2007.
- [3] R. Pallas, *SENSORES Y ACONDICIONADORES DE SEÑAL* Pallas, R. (2005). *SENSORES Y ACONDICIONADORES DE SEÑAL. Una ética para quantos?* (Vol. XXXIII). MARCOMBO, S.A., vol. XXXIII, núm. 2. 2005.
- [4] Alzate Rodríguez, E. J., Montes Ocampo, J. W., & Silva Ortega, C. A. (2007). Medidores de deformacion por resistencia: galgas extensiométricas. *Scientia Et Technica*, 1(34). Recuperado a partir de <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/551>
- [5] Beer, F. P., Johnston, E. A., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2014). *Mecánica de materiales* (7. ed.). McGraw-Hill.
- [6] O. O. Oluwole, A. T. Olanipekun, O. O. Ajide, "Design, construction and Testing of a strain gauge Instrument", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 6, núm 4, 2015.
- [7] Y.H. Huang, L. Liu, F.C. Sham, Y.S. Chan, S.P. Ng, "Optical strain gauge vs. traditional strain gauges for concrete elasticity modulus determination", *Optik*, Volume 121, núm 18, 2010.
- [8] G. Irsel, "Research on electrical strain gages and experimental stress analysis: Case study for a full wheatstone bridge", *DUJE (Dicle University Journal of Engineering)*, vol. 12, núm. 5, 2021.
- [9] A. Sil, "Interpretation of Change in Stress Measurement using Strain Gauge during Stressing of Pre-stressing Cables in a Bridge Span", *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, IJISAE, vol. 12, núm. 21, 2024.