

# Sistema para la medición de deformación usando galgas extensiométricas metálicas

*Gamil Rodríguez Rodríguez, Arturo Hernández González, Alejandro López Llanusa, Jorge Ramírez Beltrán*

## RESUMEN/ ABSTRACT

La forma usual de evaluar partes estructurales de máquinas, construcciones, vehículos, aeronaves, y otras estructuras está basada en el cálculo de la fortaleza de los materiales ante fuerzas externas. Una propiedad que representa la resistencia de los sólidos es la deformación mecánica. Es indispensable el registro y análisis de esta propiedad para caracterizar los materiales que los constituyen. En este trabajo se exponen el diseño de hardware y la implementación del firmware del prototipo de un sistema que tiene como objetivo medir la deformación mecánica en la superficie de una viga de acero en flexión mediante galgas extensiométricas metálicas. Para reducir los errores de medición se implementó un nuevo método de compensación mediante el uso de un DSSP (*Digital Sensor SignalProcessor*). Se realizó además una instalación mecánica cuyo modelado matemático permitió poner a punto el sistema diseñado. En la evaluación del desempeño del prototipo se obtuvo un error del orden de 1% de la amplitud nominal.

Palabras claves: galgaextensiométrica, deformación, DSSP.

*The common way of assessing structural parts of machines, buildings, vehicles, aircraft and other structures is based on the calculation of the strength of materials to external forces. A property representing the resistance of the solid is the mechanical deformation. The recording and analysis of this property to characterize solid materials are very important. This paper exposes the design made of hardware and firmware implementation of a prototype system that aims to measure the mechanical deformation on the surface of a steel beam in bending using metallic strain gauges. In order to reduce measurement errors a new compensation method was implemented via DSSP (Digital Sensor Signal Processor). A mechanical system which is modeled mathematically to tune the designed system was also carried out. From evaluation of prototype performance an error of about 1% over the span of measurement was obtained.*

*Keywords: strain gauge, deformation, DSSP.*

*System for measurement of deformation using metallic strain gauges.*

## INTRODUCCIÓN

Las deformaciones mecánicas fueron ampliamente estudiadas por el científico inglés Robert Hooke (1635-1703). Hooke descubrió la relación entre las fuerzas externas que se aplican a un material y la deformación que estos sufren, recogiendo sus estudios en la denominada ley de Hooke [1]. La magnitud que representa la deformación mecánica se designa por  $\varepsilon$ , la cual es adimensional y expresa, a grandes rasgos, el cambio de longitud sobre la longitud inicial como muestra la expresión siguiente.

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_o}{l_o} = \frac{\Delta l}{l_o} \quad (1)$$

La galga extensiométrica metálica fue inventada por los ingenieros Edward E. Simmons y Arthur C. Ruge en 1938. Este sensor se adhiere a los sólidos y hace una lectura directa de la deformación promedio bajo su superficie. La lectura se realiza al transmitirse la deformación de la superficie del objeto de estudio al cuerpo del sensor. Un esfuerzo que deforma a la galga metálica producirá una variación en su resistencia eléctrica. Esta variación puede ser por el cambio de longitud, el cambio en el área de la sección transversal, el cambio generado en la resistividad del sensor o una combinación de estos. La expresión teórica general de estos sensores se presenta en la ecuación (2) donde K es el factor de proporcionalidad entre la variación relativa de resistencia del sensor y la deformación mecánica. Este parámetro es conocido como factor de galga y es el parámetro más importante del sensor [2].

$$\frac{dR}{R} = K \frac{dl}{l} = K\varepsilon \quad (2)$$

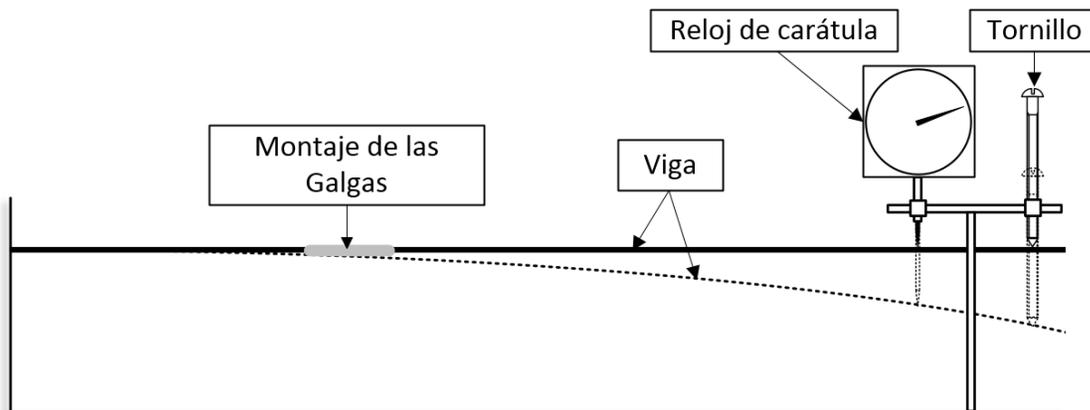
Estos sensores presentan características no deseadas que introducen errores en la señal de salida de las mismas. El mayor problema asociado a estos es que sus parámetros fundamentales poseen una gran dependencia térmica. Estos problemas son conocidos como efectos de deformación aparente. Por esta razón, se hace necesario utilizar circuitos de acondicionamiento de señal para compensar las variaciones de los parámetros con las variaciones de temperatura y ajustarlos a los valores reales.

Una de las formas más novedosas de acondicionar las señales provenientes de sensores es mediante la utilización de los DSSP (*Digital Sensor SignalProcessor*). Cuando se utilizan DSSP, los sistemas a galgas deben ser sometidos a un proceso de compensación y calibración antes de ponerlos a trabajar en su modo normal de operación. Estos dispositivos digitalizan la señal utilizando un convertidor analógico-digital (ADC) y la acondicionan digitalmente, para después devolverla al dominio analógico mediante un convertidor digital-analógico (DAC), si fuera necesario, o simplemente transmitirla mediante una salida digital. Las ventajas que ofrecen estos dispositivos están estrechamente relacionadas con la variedad de opciones que brinda la compensación digital.

Existen varios tipos de galgas con funcionamientos totalmente diferentes y para aplicaciones distintas, desde las ópticas fabricadas con hilos de fibra óptica hasta las semiconductoras fabricadas con silicio y basadas principalmente en el efecto piezorresistivo [2]. No obstante, por su bajo costo de fabricación y versatilidad las galgas más abundantes son las metálicas [3].

## INSTALACIÓN MECÁNICA

Para poner a punto el sistema se confeccionó una instalación mecánica como se muestra en la figura 1.



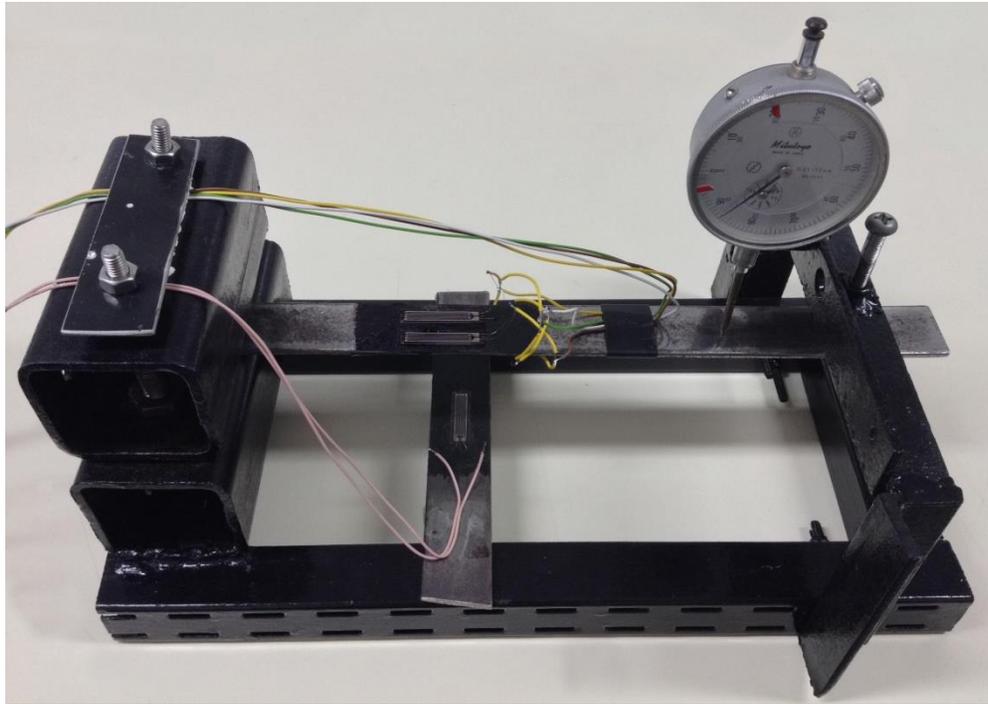
**Figura 1**  
**Esquema para simular una viga de estructura en flexión.**

Como muestra la figura anterior, la instalación consta de una viga empotrada en uno de sus extremos. Un tornillo aplica una carga en el otro extremo de la barra y esta se deforma. Esto provoca una tracción en la superficie superior de la barra y una compresión en la superficie inferior. Estas deformaciones son recogidas por las galgas. El reloj de carátula registrará el desplazamiento de un punto de la viga en dirección y sentido de la carga aplicada. Esta magnitud es conocida como flecha. La lectura del reloj de carátula en un punto dado se utiliza para deducir matemáticamente la deformación que deben reportar las galgas y así calibrar el sistema.

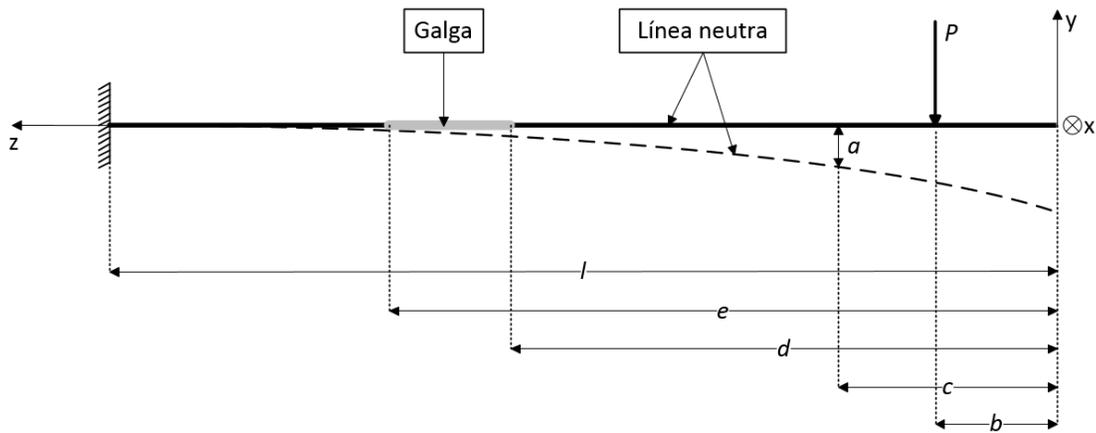
Una foto de la instalación realizada se muestra en la figura 2.

Existe una relación matemática entre la flecha y la deformación superficial puntual de una barra flexionada. Para deducir esta relación se caracteriza matemáticamente la instalación mecánica. En la figura 3 se muestra el esquema, donde toda la instalación se ha insertado en un sistema de coordenadas cartesianas  $x$ - $y$ - $z$ . El eje  $z$  coincide con la línea neutra de la barra no flexionada, concepto que se definirá a continuación.

En la figura se observan dos estados de la barra representados por las líneas neutras. Un primer estado no flexionado (línea neutra continua) y un segundo estado flexionado (línea neutra discontinua).



**Figura 2**  
**Instalación para estudiarla flexión de una viga de una estructura metálica.**



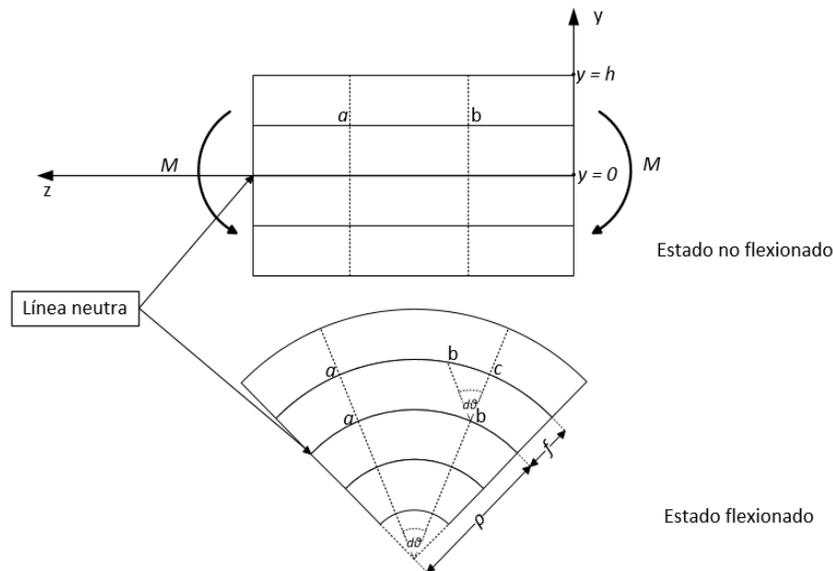
**Figura 3**  
**Diagrama de la instalación mecánica realizada.**

Para este análisis se supuso una galga longitudinal dispuesta en la superficie superior de la barra. Por tanto todo el análisis se hará para la tracción de la superficie superior de la viga. En perfiles rectangulares, como es el caso, la compresión en la superficie inferior es igual pero de signo contrario a la tracción en la superficie superior, de esta manera no es necesario un tratamiento especial para la compresión.

El objetivo del análisis es deducir la relación matemática entre la flecha  $a$  y la deformación puntual en función de la coordenada  $z$ ; con esta expresión obtenida se realizará el cálculo del promedio de la deformación en la porción de área que cubre la galga (de  $d$  a  $e$  en la figura anterior) obteniendo así la deformación teórica que sufre la galga y su variación de resistencia en función del desplazamiento que indique el reloj de carátula.

## DETERMINACIÓN DE LA TENSION PUNTUAL (MODELO DE CAPAS)

Para estudiar la tensión en la superficie y en el interior de una barra flexionada se utiliza un modelo basado en capas como muestra la figura 4.



**Figura 4**  
**Sección diferencial de la barra.**

En esta figura se observa una porción diferencial de una barra de grosor  $2h$  sometida a flexión pura, es decir, que solo en sus secciones existe momentos de fuerzas (torque) y no componentes de fuerzas. Además, se asumen las condiciones de Bernoulli, la cuales plantean en general que en flexión las capas no se comprimen entre sí. Cuando una barra se dobla ocurren deformaciones en todas sus capas menos en una línea llamada línea neutra. Esta línea es simétrica y pasa por el centro de gravedad geométrico de la sección trasversal de la barra. La línea neutra marca el cambio de signo en la deformación. De la figura anterior se extrae la siguiente relación (ecuación (3)).

$$\sigma_f = E\varepsilon_f = E \frac{bc}{ab} = E \frac{f \cdot d\theta}{\rho \cdot d\theta} = E \frac{f}{\rho} \quad (3)$$

donde  $E$  es el módulo de Young,  $\rho$  es el radio de curvatura de la línea neutra en el punto y  $f$  es la distancia de cualquier línea a la línea neutra. Esta expresión muestra la deformación o tensión mecánica puntual de cualquier línea interna de la barra. Si la línea está debajo de la línea neutra se debe poner un signo menos a la expresión para indicar compresión. Resolviendo las ecuaciones de estática sobre una sección cualquiera de la barra se llega a la ecuación [1]:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E \cdot J} \quad (4)$$

donde  $M$  es el momento flector en la sección transversal de la barra y  $J$  es el momento de inercia de la sección transversal, en este caso el momento de inercia de una sección rectangular. Sustituyendo (4) en (3) y despejando para la tensión queda:

$$\sigma_f = \frac{M}{J} f \quad (5)$$

Aunque esta expresión se analizó para flexión longitudinal, también presenta buenos resultados prácticos para flexión transversal debido a lo simple de la sección transversal, este es el caso de una barra doblada por una carga perpendicular a la línea neutra que viene siendo el caso de interés.

El momento flector se determina por un método llamado método de las secciones [1]. Para el caso en cuestión, (ver Figura 3) queda [1]:

$$M = \begin{cases} 0 & \text{para } 0 \leq z \leq b \\ -P(z-b) & \text{para } b \leq z \leq l \end{cases} \quad (6)$$

donde  $P$  es la fuerza aplicada por la carga. Como se observa, el momento flector es lineal respecto a la coordenada  $z$  y cero más allá del punto de aplicación de la carga.

Luego sustituyendo (6) en (5) queda:

$$\sigma_y = \begin{cases} 0 & \text{para } 0 \leq z \leq b \\ \frac{-P(z-b)}{J}y & \text{para } b \leq z \leq l \end{cases} \quad (7)$$

Esta ecuación expresa la tensión en cualquier coordenada de la barra ( $z; y$ ), bajo la aplicación de una fuerza  $P$  en la coordenada  $z = b$ . Si se quiere obtener el resultado en la superficie solo se evalúa  $y = h$  como muestra la Figura 4.

En la instalación mecánica preparada la fuerza  $P$  que aplica la carga es desconocida, ya que es aplicada por un tornillo. No obstante, esta puede ser deducida por el desplazamiento o flecha que marca el reloj de carátula instalado, por tanto es necesario una expresión que relacione la flecha con la carga aplicada.

## RELACIÓN ENTRE LA FLECHA Y LA CARGA APLICADA

El radio de curvatura es un concepto de Geometría Diferencial y se define como [1]:

$$\rho = \frac{(1+(y')^2)^{\frac{3}{2}}}{y''} \quad (8)$$

donde  $y$  es una función analítica en el dominio  $\mathbb{R}$ . La curva que describe la línea neutra después de flexionada la barra en el plano  $z$ - $y$  en la Figura 3 es de hecho una función analítica y en este caso  $y'$  representa la pendiente o la tangente del ángulo entre el eje  $z$  y la línea tangente en cada punto de la curva. Como el ángulo es pequeño respecto a la unidad se puede obviar este término de la expresión anterior. Luego combinando las expresiones (4), (6), (8) y despejando para  $y''$  queda la siguiente ecuación diferencial:

$$y'' = \frac{-P(z-b)}{EJ} \quad \text{para } b \leq z \leq l \quad (9)$$

Resolviendo la ecuación diferencial y despejando  $P$  del resultado, se obtiene [1]:

$$P = \frac{EJ}{A}a \quad (10)$$

donde  $a$  es la longitud de la flecha que será marcada por el reloj de carátula y  $A$  es una constante que depende del punto donde se mide la flecha y viene expresada de la siguiente forma:

$$A = \left[ \frac{(l-b)^2(c-b)}{2} - \frac{(l-b)^3}{3} - \frac{(c-b)^3}{6} \right] \quad (11)$$

De esta forma queda expresada la carga que se aplica a la viga en función de la flecha que marca el reloj de carátula.

Sustituyendo la expresión (10) en (7) y calculando para la superficie superior ( $y = h$ , ver figura 4) se obtiene:

$$\sigma_a = E\varepsilon_a = \begin{cases} 0 & \text{para } 0 \leq z \leq b \\ \frac{-Eh(z-b)}{A} & \text{para } b \leq z \leq l \end{cases} \quad (12)$$

De este modo se obtiene una expresión que relaciona la deformación y tensión puntual en la superficie de la barra en función del desplazamiento que marca el reloj de carátula y la coordenada  $z$ . Note que la expresión no depende de la forma de la sección transversal del perfil y que la expresión es lineal, lo que resulta muy oportuno para la calibración del sistema electrónico.

Aunque ya está descrita la relación matemática para un punto en la superficie de la viga esto no es lo que la galga lee. La galga mide, como ya se dijo, un promedio bajo su superficie; por tanto se deberá promediar esta magnitud puntual.

## ECUACIÓN DE TRABAJO

Por las condiciones de simetría del ensayo (ninguna magnitud depende de la coordenada  $x$ ), así como la forma rectangular de las galgas longitudinales, la media matemática o promedio en la superficie de la barra, solo depende de la coordenada  $z$  y se define como sigue:

$$\langle \sigma_a \rangle = \frac{\int_d^e \sigma_a}{e-d} \quad (13)$$

Resolviendo esta expresión se obtiene:

$$\langle \sigma_a \rangle = E \langle \varepsilon_a \rangle = \frac{EhB}{2Al_{SG}} a \quad (14)$$

donde  $l_{SG} = e - d$  es la longitud efectiva de la galga, y  $B$  es una constante que depende de la posición de la galga en la barra y se define como:

$$B = [(e - b)^2 - (d - b)^2] \quad (15)$$

De esta forma, sustituyendo la expresión (14) en (2), se obtiene la ecuación de trabajo de la instalación expresada como:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{KtB}{4Al_{SG}} a \quad (16)$$

donde  $t$  es el grosor de la viga ( $t = 2 \cdot h$ ). La expresión anterior muestra que el desplazamiento que marca el reloj de carátula es proporcional a la variación de resistencia que sufre una galga longitudinal adecuadamente colocada en la superficie de la barra que se flexiona.

La expresión anterior para las condiciones reales del experimento se define como la expresión siguiente.

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon = 6.24 \cdot 10^{-5} mm^{-1} \cdot a \quad (17)$$

## HARDWARE DEL PROTOTIPO

Un esquema del hardware diseñado se observa en la figura 5.

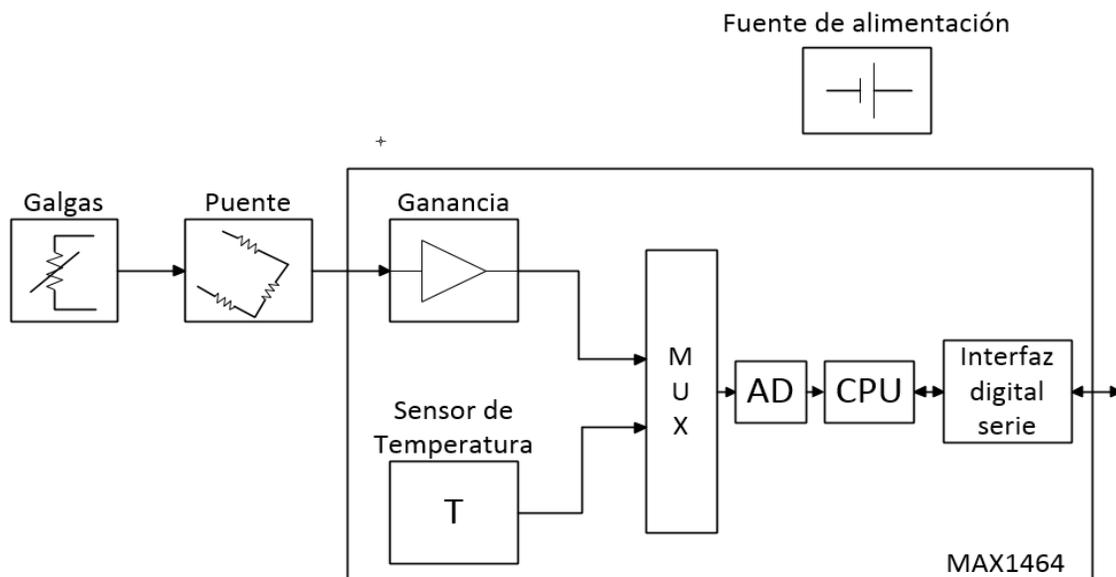
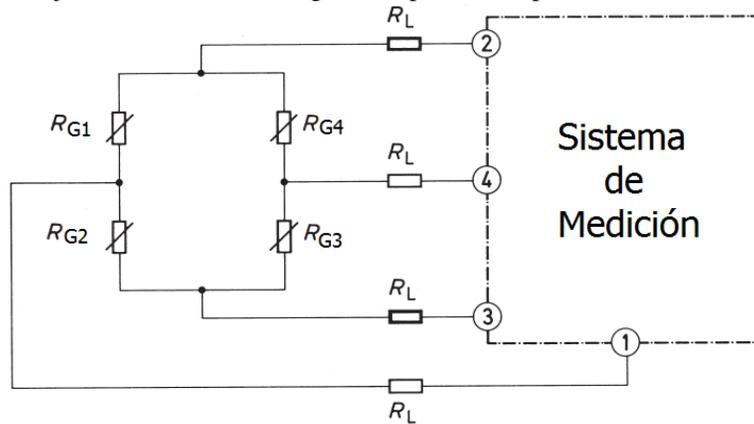


Figura 5  
 Esquema del hardware diseñado.

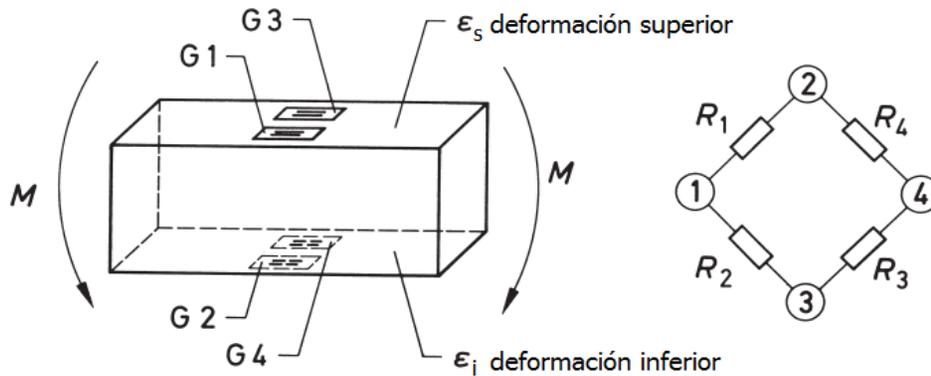
**Puente de galgas**

Como se observa, los primeros bloques del esquema representan las galgas en alguna configuración de puente de Wheatstone [4]. Para este trabajo se seleccionó la configuración puente completo como muestra la figura 6.



**Figura 6**  
**Configuración puente completo.**

Para aprovechar esta configuración y amplificar la señal de salida del puente se colocaron dos galgas en la superficie superior de la viga y dos en el mismo lugar pero en la superficie inferior como muestra la figura 7. La posición de las galgas en las ramas del puente se describe en la tabla 1.



**Figura 7**  
**Montaje de las galgas.**

**Tabla 1.**  
**Posición de las galgas en el puente.**

Ramas del puente	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>
Puente Completo	G1	G2	G3	G4

Para esta configuración, tomando la ecuación (17) para una rama y sustituyendo en la expresión de salida del puente (ecuación (18)), queda la expresión que relaciona la salida del puente alimentado con un valor de  $V_s$  de 5V DC y el valor de flecha marcada por el reloj de carátula, como muestra la expresión (19), donde  $a$  es la flecha.

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (18)$$

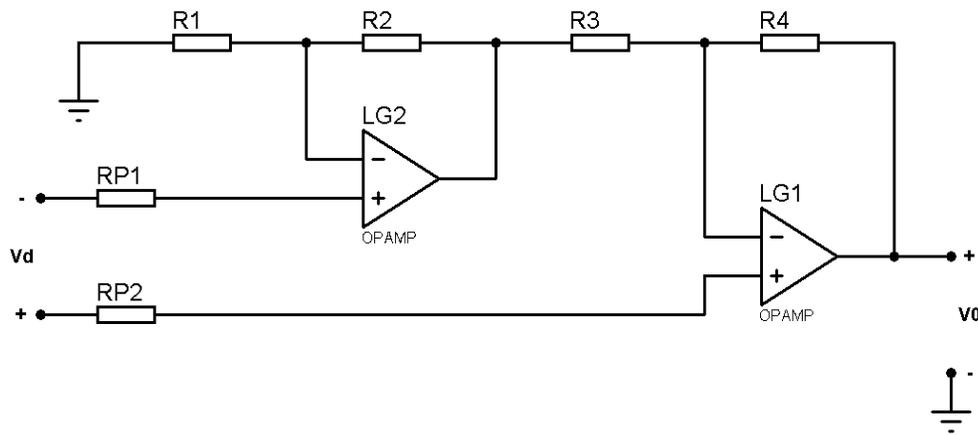
$$V_0 = 312 \frac{\mu V}{mm} \cdot a \quad (19)$$

Esta expresión es la ecuación teórica utilizada para la calibración del sistema diseñado.

### Etapa de Ganancia

La señal que sale de la configuración de puente para deformación máxima de la viga es baja comparada con la sensibilidad del DSSP utilizado, de ahí la necesidad de una etapa de ganancia. Esta etapa tiene que tener una entrada diferencial ya que amplifica la salida del puente.

Como se muestra en la Figura 5, la etapa de ganancia se encuentra dentro del MAX1464 debido a que se utilizaron los operacionales internos del mismo [5]. Estos se configuraron para ser utilizados externamente. La configuración de la etapa de ganancia se muestra en la figura 8 y su expresión de salida se observa en la ecuación (20).



**Figura 8**  
**Etapa de ganancia.**

$$v_o = v_d \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \text{ para } R_1 = R_4 \text{ y } R_2 = R_3 \quad (20)$$

Se tomaron los valores de resistencia  $R_4 = R_1 = 300 \text{ k}\Omega$  y  $R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$  para ajustar una ganancia de 31, suficiente para alcanzar la sensibilidad del MAX1464.

### El DSSP MAX1464

Como muestra el esquema del hardware, el MAX1464 incluye la mayoría de los bloques necesarios para el diseño del sistema propuesto. Contiene un sensor de temperatura que sirve de referencia para la compensación térmica mediante el firmware y una interfaz digital para la comunicación y acceso al dato de deformación compensado y linealizado. La compensación térmica y linealización se realiza en tiempo real con la ejecución del firmware programado en la memoria de programa del DSSP.

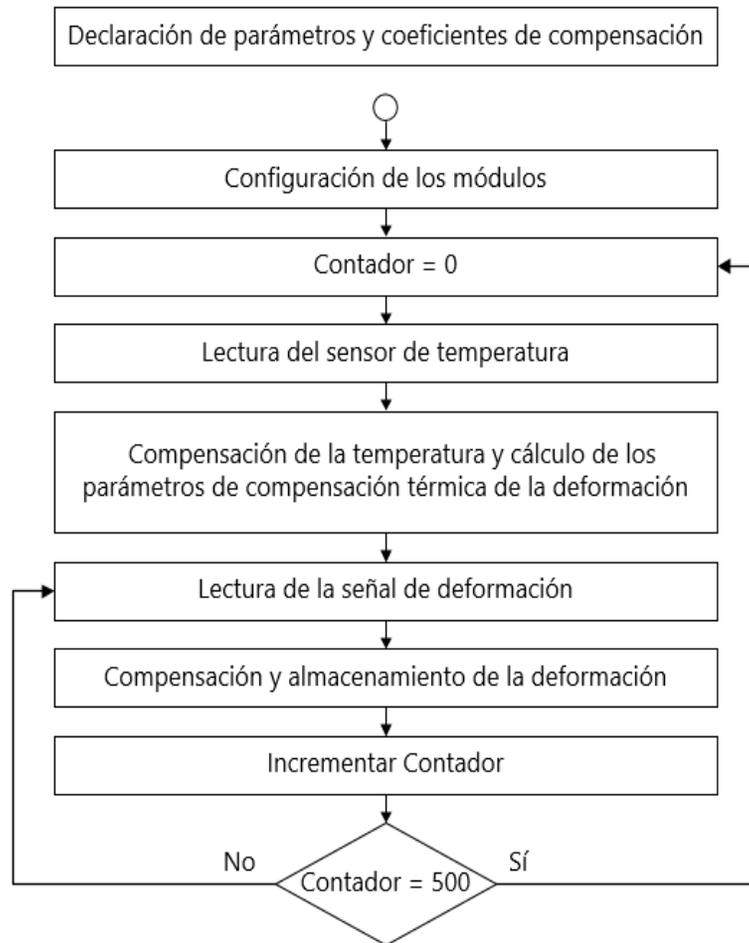
## FIRMWARE DEL SISTEMA

En la figura 9 se muestra un diagrama de flujo general del *firmware* programado en el DSSP. Se programó en lenguaje ensamblador y se utiliza el editor de texto Scite versión 1.44.

Como muestra la figura anterior este programa está estructurado en un solo ciclo que se ejecuta en tiempo real y de forma secuencial constantemente. El primer bloque consiste en la declaración de los parámetros y coeficientes de compensación que necesita el *firmware* para compensar la señal de deformación en tiempo real. Estas constantes son extraídas de un algoritmo de calibración aplicado al sistema de medición bajo las condiciones reales de trabajo. Al comenzar la ejecución del programa, la primera tarea que se hace es la configuración de los módulos. Este bloque prepara los módulos del DSSP para su correcto funcionamiento en la aplicación. El bloque que le sigue es la inicialización de un contador el cual se usará

para diferenciar la frecuencia con que se lee la temperatura y la deformación. A continuación está la lectura del sensor interno de temperatura del MAX1464, cuyo valor se compensa en el próximo bloque.

Con la temperatura compensada y los coeficientes declarados en el primer bloque se calculan los parámetros necesarios para la compensación de la deformación. Luego se lee la señal amplificada proveniente del puente que representa la deformación. Esta señal se compensa con los coeficientes calculados en el bloque anterior para lograr la compensación térmica y se almacena para ser leída desde la interfaz digital. Se incrementa el contador y se compara con 500, si no ha llegado a este valor aún, se repite el procedimiento a partir de la lectura de deformación, sino se repite a partir de la inicialización del contador a cero. Esto garantiza que se realicen 500 lecturas de deformación para una sola lectura de temperatura. El ciclo se repite indefinidamente.



**Figura 9**  
**Diagrama de flujo de firmware.**

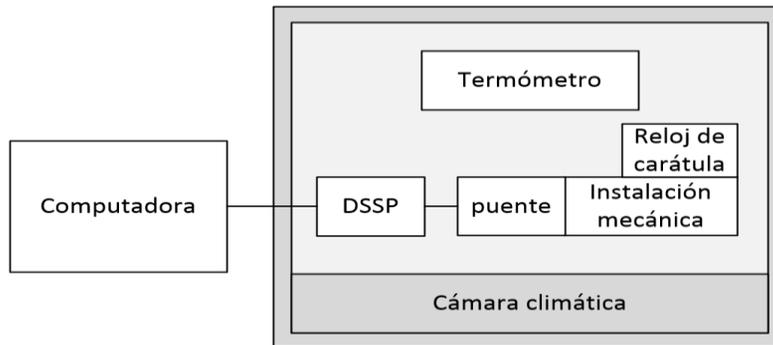
### **Obtención de los parámetros y coeficientes de compensación**

Para determinar los parámetros y coeficientes de compensación se caracteriza el sistema. Para esto se tiene que someter la aplicación a las condiciones reales de trabajo en cuanto a variación de temperatura y deformación en todo el rango de medición. Con este fin, se introduce la instalación mecánica con el montaje de las galgas y el DSSP en una cámara climática, como muestra el esquema de la figura 10. Entonces se realiza un proceso de adquisición donde se fijan tres puntos de temperatura: temperatura máxima, mínima y alguna intermedia [5]. Para cada una de las tres temperaturas se aplican y se leen tres flexiones a la viga: flexión mínima, media y máxima. Con estas flexiones se determinan las deformaciones en las galgas mediante la expresión (14). Además, se lee la lectura del sensor interno de temperatura del MAX1464.

La figura 10 muestra la comunicación del DSSP con una computadora. Esto se realiza mediante su interfaz serie con el objetivo de registrar los datos leídos por el ADC. Maxim ofrece el *hardware* y *software* para realizar esta tarea.

Del proceso de adquisición anterior se extrae una matriz de datos similar a la que se muestra en la figura 11. Procesando esta se extraen los coeficientes y parámetros buscados.

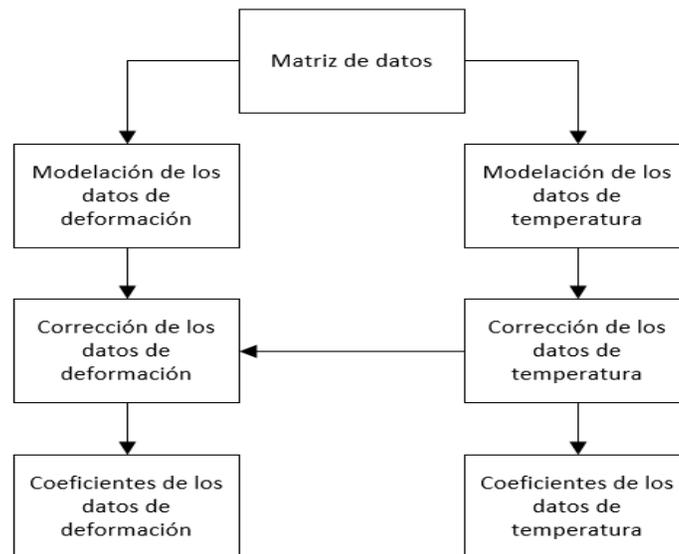
Para procesar la matriz de la figura anterior, Maxim ofrece un archivo fuente desarrollado en el programa MathCAD el cual recoge un algoritmo de calibración [6]. Este realiza una serie de procedimientos y análisis los cuales permiten extraer los parámetros y coeficientes buscados de la matriz anterior. La figura 12 muestra el diagrama en bloques del algoritmo de calibración, adaptado para la aplicación con galgas [7].



**Figura 10**  
**Esquema para la calibración.**

$$\text{datos} := \begin{pmatrix} 0 & D_{\min} & D_{\text{med}} & D_{\max} & \text{Temperatura} \\ T_{\min} & 0A836h & 00741h & 0659Fh & 0E0AFh \\ T_{\text{int}} & 0B148h & 001EAh & 05229h & 0F8C7h \\ T_{\max} & 0B6B0h & 0F6F5h & 03713h & 01C9Fh \end{pmatrix}$$

**Figura 11**  
**Matriz de caracterización del sistema.**



**Figura 12**  
**Diagrama de bloques del algoritmo de calibración.**

En los bloques del esquema anterior se observan las tareas que se realizan en el proceso de los datos. Las primeras consisten en la modelación apoyado en la matriz de los datos de deformación y temperatura leídos respecto a los datos reales de estas magnitudes. Luego se realiza la corrección de la modelación de la temperatura. Estos datos compensados de temperatura son utilizados además para la corrección térmica de los datos de deformación. En este proceso de corrección se van deduciendo los coeficientes y parámetros que el firmware utiliza para compensar la deformación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Todos los errores analizados en esta sección se denominan errores respecto a la amplitud nominal, se dan en porciento y se definen como muestra la expresión 21.

$$Er = \frac{x^* - x}{R_x} \cdot 100 \quad (21)$$

Donde  $x^*$  es la señal en análisis,  $x$  es la señal de referencia, sea teórica o no y  $R_x$  es la amplitud nominal o *span* de la señal de referencia.

### Caracterización del puente completo

Con el objetivo de caracterizar la configuración de galgas analizadas, se midió la salida del puente montado sobre la instalación mecánica para cuatro puntos de temperatura y nueve puntos de deformación. Se midió por cada milímetro de flecha la salida del puente en mV. Este proceso se repitió para cada valor de temperatura. Se alimentó el puente con una fuente de 5V de corriente directa y se midió con una resolución de  $\pm 0.05$  mV. Esto permitió observar la salida del puente ante cambios de temperatura sin compensación ni linealización alguna. La tabla 2 muestra los resultados obtenidos.

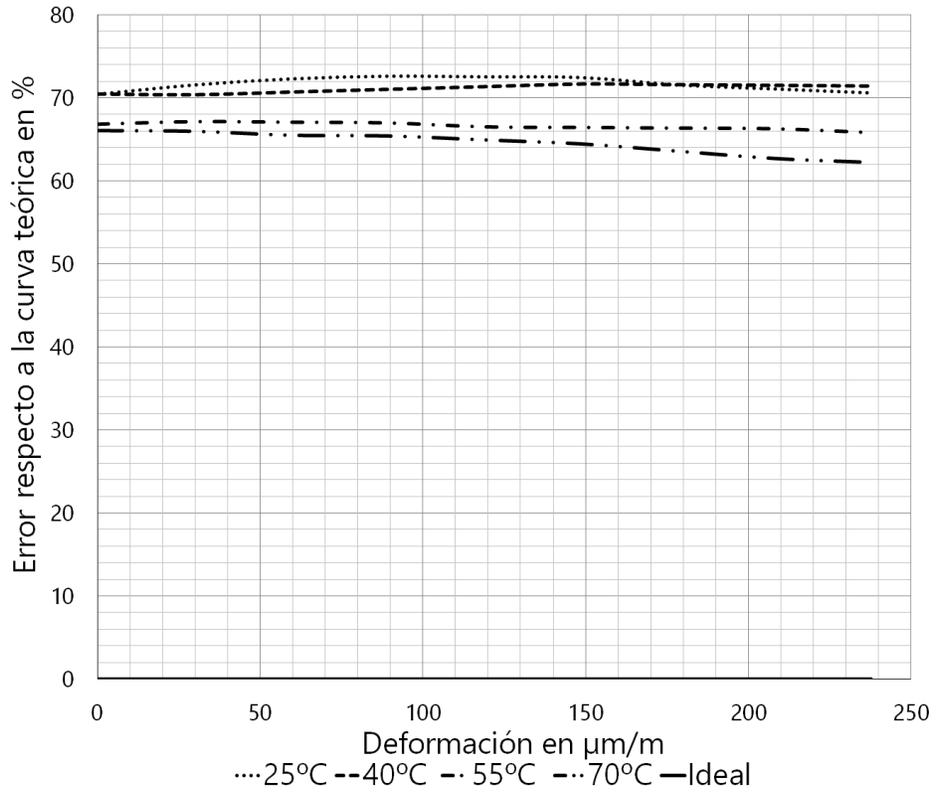
**Tabla 2.**  
**Caracterización de puente completo con galgas.**

Flecha (mm)	Deformación ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	Salida del puente (mV)			
		25°C	40°C	55°C	70°C
0	0	1,76	1,76	1,67	1,65
1	29,7	2,1	2,07	1,99	1,96
2	59,4	2,43	2,39	2,3	2,26
3	89,1	2,75	2,71	2,61	2,57
4	118,8	3,06	3,03	2,91	2,87
5	148,5	3,37	3,35	3,22	3,17
6	178,2	3,66	3,66	3,53	3,46
7	207,9	3,96	3,97	3,84	3,75
8	237,7	4,26	4,28	4,14	4,05

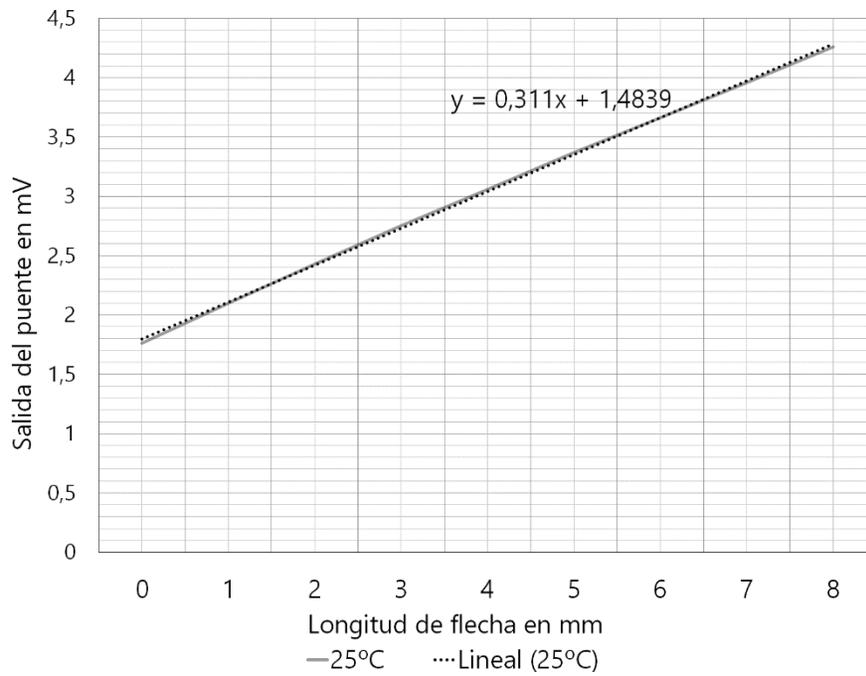
Determinando el error relativo a la amplitud nominal, tomando como referencia la salida teórica de la expresión 19 se realizó el gráfico que se muestra en la figura 13, el cual representa el error cometido contra la deformación que mide la galga. Como se muestra en esta figura la curva teórica está encima del eje de las  $x$  y los valores tomados del puente presentan un offset. Esto se debe a que en la configuración puente completo no se balancea el puente antes de medir. El error máximo que esta configuración reporta es del orden del 10% respecto a la amplitud nominal sin considerar el offset [2]. Esto demuestra la necesidad de un algoritmo de calibración y compensación térmica para obtener un error inferior al 5% de la amplitud nominal y satisfacer los requisitos de la aplicación.

### Validación del modelo mecánico

Todo el sistema se referenció y calibró respecto al valor teórico definido en (19). Para validar el modelo empleado se tomaron los datos de caracterización a temperatura ambiente del puente completo y se determinó la línea de tendencia respecto a los valores del reloj de carátula. Esto se muestra en la figura 14.



**Figura 13**  
**Error respecto a la curva teórica en %.**



**Figura 14**  
**Línea de tendencia para configuración puente completo.**

Realizando una comparación entre la curva empírica (ecuación (22)) y la teórica (ecuación (19)) se muestra como el error de pendiente cometido es de solo 0,001mV/mm. Considerando las posibles fuentes de errores de la instalación mecánica, el resultado obtenido fue satisfactorio y demostró la veracidad del modelo empleado.

$$V_0 = 311 \frac{\mu V}{mm} \cdot a + 1483,9 \mu V \quad (22)$$

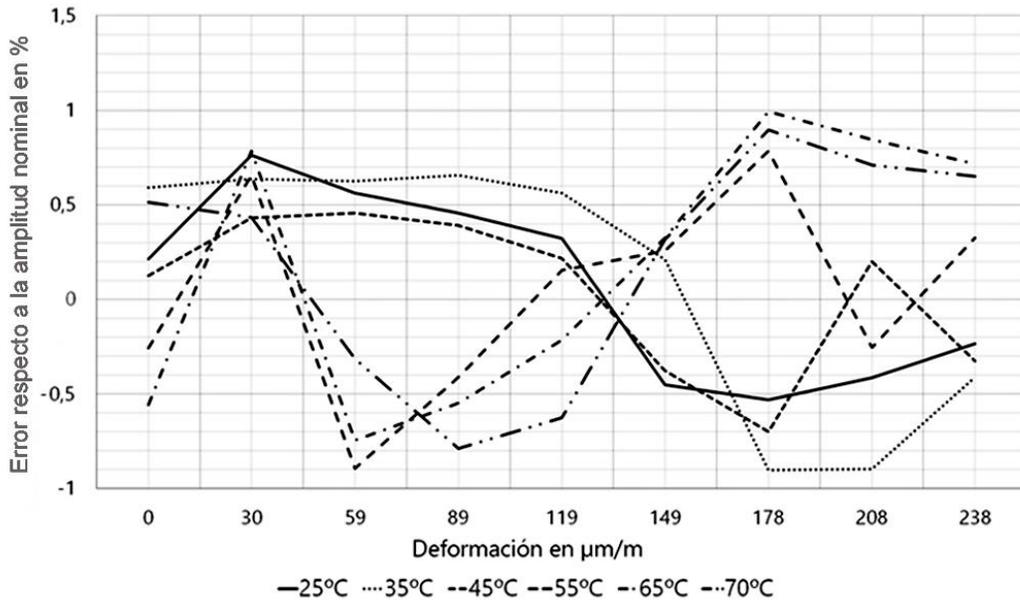
**Validación del firmware y exactitud del sistema**

Con el objetivo de verificar la compensación de temperatura y la linealización que realiza el firmware y en general la exactitud del sistema diseñado, se introdujo el prototipo dentro de la cámara climática y se sometió a 9 puntos de deformación y a seis puntos de temperatura.

La tabla 3 muestra los datos de validación obtenidos para temperatura ambiente. Aquí se observan los puntos ideales de deformación y los datos reales obtenidos desde el DSSP. Estos se normalizaron y se determinó el error relativo a la amplitud nominal en porcentaje respecto a la curva ideal de salida. Este error se insertó en una gráfica para cada temperatura como muestra la figura 15.

**Tabla 3 Validación a temperatura ambiente**

Deformación en $\mu\text{m/m}$	Temperatura 25°C			
	Salida ideal normalizada	Salida real hexadecimal	Salida real normalizada	Error relativo a la amplitud nominal en %
0	-0,9	8D4B	-0,89615	0,213962
29,7	-0,68	AB57	-0,66141	0,760399
59,4	-0,45	C7AC	-0,44006	0,562547
89,1	-0,23	E437	-0,21707	0,456247
118,8	0	BE	0,005798	0,32213
148,5	0,23	1BB3	0,2164	-0,45148
178,2	0,45	384D	0,43985	-0,53234
207,9	0,68	555C	0,66687	-0,41485
237,7	0,9	72A8	0,895752	-0,236



**Figura 15**  
**Error respecto a la amplitud nominal en por ciento.**

En la figura anterior se muestra como se corrige el offset que se observó en la caracterización de la configuración, lo que se realizó mediante los módulos de acondicionamiento analógico internos del DSSP. Para 65 grados Celsius ocurre un error máximo de aproximadamente 1% disminuyendo el error 10 veces respecto a la señal de caracterización sin compensación. Este hecho pone de manifiesto la necesidad en la aplicación de un algoritmo de compensación para el tratamiento de las señales de las galgas, lo que se realiza en este trabajo con el DSSP MAX1464 de Maxim.

## CONCLUSIONES

Las galgas extensiométricas metálicas en configuración puente de Wheatstone son adecuadas para la medición de deformaciones en estructuras metálicas. Además se concluye que el efecto de deformación aparente y las dependencias térmicas del sistema en general pueden ser reducidos mediante un algoritmo de calibración implementado en un DSSP. Por último se concluye que el prototipo diseñado es capaz de medir deformaciones superficiales usando galgas extensiométricas metálicas con una exactitud de 1% de la amplitud nominal.

## REFERENCIAS

1. Pavlov PV. Física del Estado Sólido. URSS: Editorial MIR; 1987.
2. Hempel M, Nezich D, Kong J, Hofmann M. A novel class of strain gauges based on layered percolative films of 2D materials. Nano letters. 2012;12(11):5714-8
3. Sosnowchik BD, Azevedo RG, Myers DR, Chan MW, Pisano AP, Lin L. Rapid silicon-to-steel bonding by induction heating for MEMS strain sensors. Journal of Microelectromechanical Systems. 2012;21(2):497-506.
4. Hoffmann K. An introduction to stress analysis and transducer design using strain gauges. Germany: HBM Test and Measurement; 2012.
5. Gonzalez AH, Beltran JR, Ceron JFT, Rodriguez EC. New Architecture for Intelligent Pressure Sensors with Analog and Digital Outputs. IEEE Latin America Transactions. 2014;12(2):116-2
6. Mayor CA, Charry E, Muñoz RR, Beltrán JR, Rodríguez EC. Compensación y calibración de transmisores de presión piezorresistivos de alto desempeño de forma simultánea. Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, RIELAC, 2014;35(3):16-32.
7. Ibarra ARG, González AH, Beltrán JR, Muñoz RR, Rodríguez EC. Transmisor de presión diferencial de muy alta precisión y estabilidad. Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, RIELAC. 2014;35(1):57-77.

## AUTORES

**Gamil Rodríguez Rodríguez** – Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica. Departamento de Física, Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba, [gamilr6@gmail.com](mailto:gamilr6@gmail.com)

**Arturo Hernández González** – Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica. Centro de Investigaciones en Microelectrónica de la Facultad de Telecomunicaciones, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba, [arturo@electronica.cujae.edu.cu](mailto:arturo@electronica.cujae.edu.cu)

**Alejandro López Llanusa** – Ingeniero Civil. Máster en Ingeniería Civil. Centro de Estudios de la Construcción y Arquitectura Tropical de la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba, [alo@civil.cujae.edu.cu](mailto:alo@civil.cujae.edu.cu)

**Jorge Ramírez Beltrán** – Ingeniero Electrónico. Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Investigaciones Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba, [jramirez@cih.cujae.edu.cu](mailto:jramirez@cih.cujae.edu.cu)