

DISEÑO, SIMULACIÓN Y ENSAYO DE UN SENSOR DE DEFORMACIÓN PARALELO DE ALTA GANANCIA

Gustavo G. Vignolo^{a,b}, y José A. Vázquez^b

^a *Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Ruta Prov. N° 1, Km. 4 – 9000 – Comodoro Rivadavia - Chubut, ARGENTINA, gvignolo@plapiqui.edu.ar*

^b *Departamento de Ingeniería, TECSS S.R.L, Álvarez Jonte 158, Km. 5 -9000 - Comodoro Rivadavia - Chubut, ARGENTINA*

Palabras Clave: Strain gage, deformación, dilatación térmica.

Resumen: El conocimiento de los esfuerzos sobre estructuras o maquinaria es crucial tanto en aquellos casos en donde la integridad de las mismas o la seguridad de la operación puedan verse involucradas, como la posibilidad de determinar el nivel de capacidad o producción en la que se encuentran. Excepto por la premisa de salvaguardar las vidas involucradas, en ambos argumentos se advierte un profundo interés económico. En el primero, una protección contra sobrecargas permite prolongar la vida útil de la unidad resguardada, mientras que en el segundo la medición del esfuerzo puede llevar directa o indirectamente a la cuantificación de la variable que mide el rédito económico de estructura o maquinaria en la que se efectúe. Un claro ejemplo de esta última es la determinación de la carga interior de un silo mediante los esfuerzos en sus anclajes.

Para la determinación del esfuerzo actuante sobre un elemento estructural se recurre generalmente a la medición de su deformación. Esta tarea resulta no trivial dado que el diseño de los dispositivos de medición de las deformaciones, requiere, entre otros requerimientos, la necesidad imperiosa de poder discernir entre deformaciones provocadas por las solicitaciones de interés, y aquellas asociadas a factores ajenos tales como la dilatación térmica. Asimismo, cuando la estructura no está especialmente diseñada para el montaje de estos medidores, los valores de deformación que deben registrarse son muy pequeños lo cual implica que el instrumento cumpla con la doble función de amplificar la deformación debida a las fuerzas a determinar, a la vez que reduzca al mínimo la deriva ocasionada por otros efectos.

En este trabajo se presentan las consideraciones sobre el diseño de un sensor de deformación para ser montado en paralelo sobre una viga, con el fin de determinar la carga sobre la misma. Las premisas del desarrollo fueron alta ganancia y compensación térmica. Como resultado de un estudio analítico se determinó la geometría óptima, mientras que el desempeño fue evaluado numéricamente en simulaciones térmicas y de carga. Las predicciones obtenidas fueron contrastadas con prototipos ensayados tanto en condiciones de laboratorio como de campo. Los resultados numéricos y experimentales mostraron buena concordancia, corroborando las consideraciones de diseño.

1 INTRODUCCIÓN

La creciente competitividad requiere que los procesos industriales sean cada vez más eficientes, lo que implica una mayor comprensión de las variables operativas. Esto lleva a cambiar radicalmente el modo de monitorear aquellas operaciones en las que sólo se cuantifican los parámetros de funcionamiento esporádicamente o bien al modificar el régimen de operación. Por ello se utiliza un sistema de control y gestión integrado que puede construirse gracias a la actual tecnología de instrumentación.

En toda industria existen componentes cuya estructura está sometida a algún tipo de carga (fuerza) relacionada con el proceso, y ésta es precisamente la variable física de interés en este trabajo. Históricamente, dicha variable fue considerada crucial tanto para la integridad de los equipos como por la seguridad de la operación. No obstante, la evolución de la tecnología ha permitido que se convierta también en un indicador de producción o ventas. Es cada vez más frecuente el empleo de los valores de esfuerzo sobre las estructuras como indicador productivo. Pueden citarse como ejemplos la implementación de celdas de carga externas adheridas a los cimientos de silos de grano, cemento, etc., con la finalidad de determinar el acopio existente y cuantificar las descargas (ventas). Otra aplicación de interés es la medición de cartas dinamométricas en Aparatos Individuales de Bombeo de Petróleo, en los cuales el conocimiento de las cargas de funcionamiento permite inferir la eficiencia del bombeo. Independientemente de la industria de que se trate, pueden encontrarse equipos ya provistos de fábrica con sensores para determinar las cargas que actúan sobre ellos, no obstante, existe un sinnúmero que en su diseño original no contemplaron esta posibilidad. En ese caso, debe adaptarse apropiadamente un instrumento que cumpla con ciertos requisitos específicos de la estructura en cuestión y de la carga a determinar.

Para la determinación del esfuerzo actuante sobre un elemento estructural se recurre generalmente a la medición de su deformación. Dada la naturaleza de las aplicaciones mencionadas, el diseño de estos elementos de medición debe contemplar su estabilidad en todas las condiciones de trabajo. Al utilizar medidores de deformación, debe prestarse especial atención al aspecto referente a la comprensión y compensación de deformaciones aparentes, que no son de interés en el elemento sensado, pero que son registradas por el medidor. Estas fuentes de error presentes en la instalación de indicadores de deformación pueden deberse a la variación de la temperatura, histéresis, creep, fatiga y humedad, entre otros (Collet, 1976). Las variaciones térmicas son las más frecuentes y por ende las de mayor interés. Ha sido probado que cambios normales de temperatura ambiente pueden llegar a inducir errores del orden de la medición que se desea determinar (Collet, 1976).

En el empleo convencional de sensores de deformación para, por ejemplo, fabricación de celdas de carga, el problema de la deriva térmica puede ser fácilmente mitigado mediante una correcta conexión de los sensores (Figliola y Beasley, 2003; Khan and Wang, 2001). En general, en estos casos las lecturas de fondo de escala implican llevar al material a esfuerzos cercanos a la fluencia, por lo que la incidencia de factores externos puede despreciarse frente a la magnitud de la deformación unitaria a la que se encuentra sometido el material (Feodosiev, 1972). No obstante, para aquellos casos particulares en los que se desea determinar deformaciones pequeñas, los órdenes de magnitud son comparables y deben extremarse las precauciones en el diseño mecánico, en la selección de los elementos sensores, en la conexión de los mismos y en la electrónica asociada (Vishay Precision Group, 2010 a, b y c).

En el presente trabajo se desarrolla el estudio de un medidor de deformación de alta ganancia y deriva térmica acotada, para ser montado en paralelo sobre el elemento estructural de interés.

Se aborda en primera instancia el análisis de la geometría conveniente para poder amplificar las deformaciones a medir. Posteriormente se propone un diseño bajo las premisas geométricas encontradas y se lo somete a un estudio numérico tanto estático como térmico. Finalmente, luego de llevar a la práctica el diseño estudiado y someterlo a ensayos tanto de laboratorio como de campo, se comparan los resultados numéricos con los experimentales.

2 GENERALIDADES SOBRE LOS SENSORES DE DEFORMACIÓN

Los sensores de deformación son los elementos encargados de sensar las deformaciones y transformarlas en una señal eléctrica. Están compuestos de dos partes, una es un cuerpo elástico que absorbe la carga y se deforma proporcionalmente, y la otra consiste en un elemento (transductor) capaz de variar alguna de sus propiedades físicas en función de la deformación.

El cuerpo elástico suele ser una pieza metálica de forma apropiada según sea la carga a absorber y las condiciones de rigidez necesarias. Su diseño se optimiza para aumentar la deformación por unidad de carga donde se fijan los transductores, es decir, para aumentar la sensibilidad. Para ello se recurre a diversos concentradores de deformación tales como agujeros, entallas, reducciones de sección, etc. (Flores *et al.*, 2006).

Los transductores más empleados en la fabricación de estos sensores son los strain gages o galgas extensiométricas (Alzate Rodríguez *et al.*, 2007). El strain gage de película adherida es el tipo más empleado en análisis experimentales de tensiones, y es el utilizado en este caso. Consiste de una grilla de una fina película de aleación especial unida a un film o base de soporte. La resistencia eléctrica de la grilla varía linealmente con la deformación.

Básicamente existen dos formas, radicalmente diferentes, de disponer un instrumento para determinar un esfuerzo: en serie o en paralelo con la carga. Cada disposición tiene sus propios requerimientos. En el primer caso el instrumento debe soportar toda la carga que recibe la estructura, para lo cual se necesita una geometría rígida y resistente. En el segundo caso se debe asegurar que el instrumento copie fielmente la deformación del elemento estructural sometido a carga. Por lo tanto la rigidez de diseño del mismo dependerá pura y exclusivamente de los medios disponibles de sujeción. Es decir, a igualdad de deformación de la estructura, cuanto más rígido sea el instrumento, más esfuerzo sobre los anclajes que lo vinculan a la estructura.

2.1 Propiedades de las Galgas Extensiométricas (strain gages)

La aplicación de galgas extensiométricas requiere, en principio, el conocimiento de dos características fundamentales de las mismas, su resistencia eléctrica, R , y su Factor de Galga, FG , definido como el cociente entre el cambio unitario de R , y la deformación unitaria, ε_p , que la produce. Es decir:

$$FG = \frac{\delta_R / R}{\delta_L / L} = \frac{\delta_R / R}{\varepsilon_p} \quad (1)$$

Dado que el cambio en la resistencia, δ_R , es mucho menor que el propio valor de resistencia de la galga, se precisa que el circuito eléctrico que toma esta variación esté compuesto por un puente de Wheatstone (Figura 1a). E_0 es la tensión de salida del puente en condiciones iniciales, y δE_0 es el cambio ocasionado en ella por δ_R . E_i es la tensión de alimentación del puente. La salida para un solo medidor que sufre una deformación ε_p se expresa como:

$$\frac{\delta E_0}{E_i} = \frac{\varepsilon_p FG}{4} \quad (2)$$

Cuando en el circuito puente se utiliza más de un medidor (Figura 1b) puede estimarse que:

$$\frac{\delta E_0}{E_i} = \frac{FG}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_4 - \varepsilon_3) \approx \frac{\kappa FG}{4} \varepsilon = GE\varepsilon \quad (3)$$

donde κ se denomina Constante del Puente y GE , Ganancia Eléctrica. El valor que tomen κ y GE depende de la configuración del puente y de las características de las galgas.

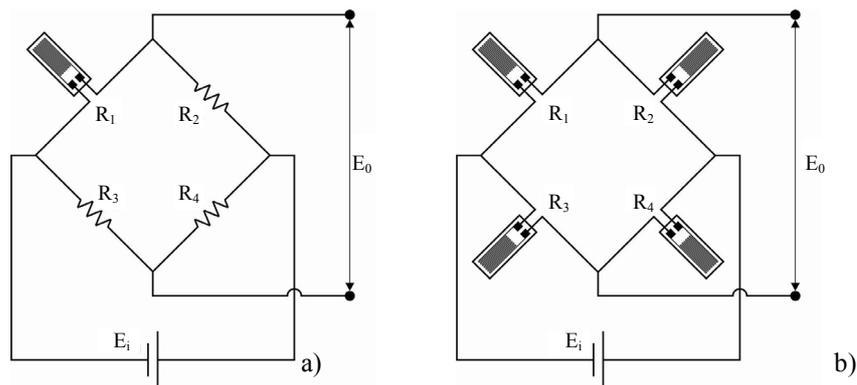


Figura 1: Circuito puente de Wheatstone: a) con una sola galga, b) con cuatro galgas activas.

El signo y magnitud de cada ε_i depende de dónde esté fijada cada galga. Puede verse en la Ecuación (3) que las deformaciones iguales en brazos opuestos del puente se suman, mientras que las deformaciones iguales en brazos adyacentes se cancelan. Estas características permiten incrementar la salida del puente y proporcionar compensación de temperatura y/o cancelar componentes indeseables de deformación. Por ejemplo, si mediante el adecuado diseño de la celda se logra que la deformación medida por las galgas 1 y 4 sea igual y opuesta a la medida por las galgas 2 y 3, entonces $\kappa=4$ y $GE=FG$. Si un cambio térmico produce dilatación y variación en la resistencia de las galgas, como todas sufren la misma deformación por estar adheridas al mismo cuerpo, la salida del puente será nula porque $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_4 - \varepsilon_3 = 0$ (Figliola y Beasley, 2003).

3 REQUERIMIENTOS DE LA APLICACIÓN

Las principales motivaciones del diseño son lograr un instrumento de medición de tipo paralelo, de fabricación local, fácil montaje, alta ganancia y estabilidad, y bajo costo. En general los sensores comerciales se disponen en serie con la carga. Para ello necesitan alta sensibilidad y alta rigidez dado que la deformación que debe sufrir la máquina o estructura no debe alterar su funcionamiento normal. A modo de ejemplo, en máquinas que efectúen operaciones de precisión, la deformación admitida ronda entre $2,5 \times 10^{-4}$ y $2,5 \times 10^{-2}$ mm. Un tamaño razonable para estos instrumentos es del orden de 25mm, por lo que la deformación unitaria ronda entre, 1×10^{-5} y 1×10^{-3} (Hecker *et al.*, 2007; Karabay, 2007).

Por el contrario, el caso en estudio requiere que la deformación unitaria que recibe el sensor sea lo mayor posible, y esto depende exclusivamente de la deformación unitaria del elemento estructural en el punto donde se lo monte. Por ejemplo, para el caso de una viga sometida a flexión, debe situarse donde el momento flector es máximo.

En mediciones efectuadas sobre un equipo en el cual se pretende aplicar este diseño, se

utilizó un dispositivo comercial en serie con la carga F , para determinar la deformación unitaria ε sobre una viga de rigidez $EI=986\text{MPa}\cdot\text{m}^4$ y dimensiones $A=5,3\text{m}$ y $B=3\text{m}$ (Figura 2). Se obtuvo una deformación unitaria máxima, $\varepsilon_{\text{max}}=1\times 10^{-4}$. Esto explica la necesidad de que, además de muy baja rigidez, instrumento a diseñar requerirá muy alta sensibilidad o ganancia.

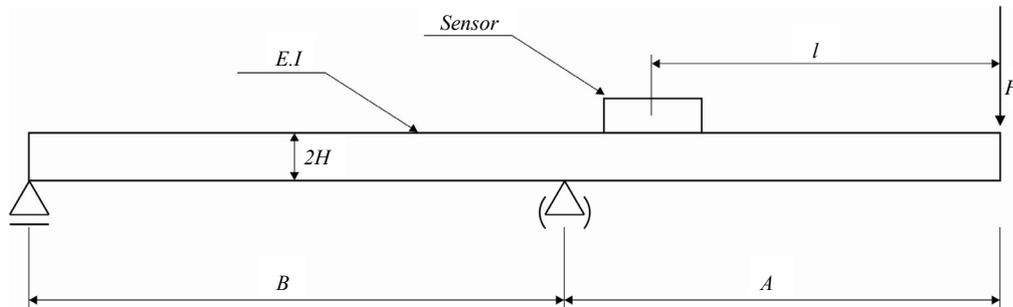


Figura 2: Características principales de una viga tipo.

4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

La necesidad de incrementar la sensibilidad o ganancia mecánica (GM) lleva a buscar opciones que amplifiquen la deformación unitaria donde se fijan las galgas. Esto genera múltiples opciones que se va cerrando cuando se busca, a la vez, mantener la baja rigidez del cuerpo elástico. En trabajos anteriores (Vignolo *et al.*, 2008-2011), se ha empleado una disposición que concentra toda la deformación en una zona estrecha, fijando las galgas sobre un elemento elástico de bajo módulo de elasticidad y sección resistente reducida. Esta combinación ha permitido lograr una amplificación del orden de la relación entre la separación de los anclajes del instrumento a la estructura y la separación de los anclajes del elemento elástico al instrumento (en general, $GM < 10$). Esta configuración ha demostrado la utilidad del empleo de un elemento elástico postizo de baja rigidez para fijar las galgas.

Con el objetivo de incrementar la sensibilidad respecto de los modelos comerciales y respecto de los prototipos previos, se evaluaron diversas alternativas. En la Figura 3 se muestra un esquema básico de la configuración para el instrumento analizada. En ella se aprecia un instrumento de longitud L , fijado en los puntos 1, 2 y 3 a la estructura.

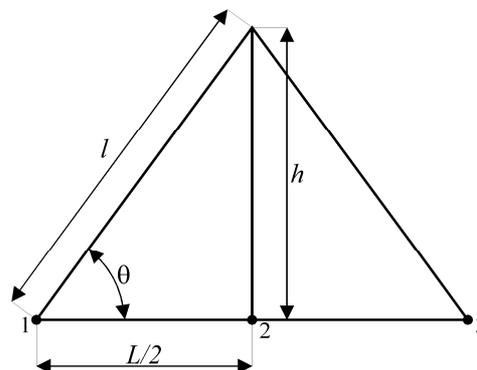


Figura 3: Esquema básico de la geometría del instrumento.

El brazo l se considera rígido y se determina la deformación del brazo de longitud h , ante un cambio en la deformación de la estructura, Δ_L . Si se analiza la geometría, se tiene que

$$l^2 = \left(\frac{L}{2}\right)^2 + h^2, \quad (4)$$

donde diferenciando y considerando que la deformación unitaria se define como $\varepsilon_i = \frac{\Delta_i}{i}$ se llega a

$$0 = \frac{1}{2} L dL + 2h dh \Rightarrow 0 = \frac{1}{2} L^2 \frac{dL}{L} + 2h^2 \frac{dh}{h} \Rightarrow 0 = \frac{1}{2} L^2 \varepsilon_L + 2h^2 \varepsilon_h \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que $\tan \theta = \frac{h}{L/2} \Rightarrow (\tan \theta)^2 = \frac{4h^2}{L^2}$, se obtiene entonces:

$$\varepsilon_h = -\frac{L^2}{4h^2} \varepsilon_L = -\frac{1}{(\tan \theta)^2} \varepsilon_L \quad (6)$$

$$\Rightarrow GM = \left| \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_L} \right| = \frac{1}{(\tan \theta)^2}$$

Puede apreciarse en la Ec. (6) que para ángulos muy pequeños ($\theta \rightarrow 0$), GM toma valores muy grandes ($GM \rightarrow \infty$). Estos resultados son válidos sólo si se considera que ante un cambio en L , la única variable del instrumento que se ve afectada es h .

Si se tiene en cuenta la posibilidad de que el instrumento se deforme al hacerlo la estructura, la Ec. (6) se convierte en

$$2l dl = \frac{1}{2} L dL + 2h dh \Rightarrow 2l^2 \varepsilon_l = \frac{1}{2} L^2 \varepsilon_L + 2h^2 \varepsilon_h \quad (7)$$

Considerando que $\tan \theta = \frac{h}{L/2} \Rightarrow (\tan \theta)^2 = \frac{4h^2}{L^2}$ y que $\sin \theta = \frac{h}{l} \Rightarrow \frac{1}{(\sin \theta)^2} = \frac{l^2}{h^2}$, se obtiene entonces:

$$\varepsilon_h = -\frac{L^2}{4h^2} \varepsilon_L + \frac{l^2}{h^2} \varepsilon_l = -\frac{1}{(\tan \theta)^2} \varepsilon_L + \frac{1}{(\sin \theta)^2} \varepsilon_l \quad (8)$$

$$\Rightarrow GM = \left| \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_L} \right| = \frac{1}{(\tan \theta)^2} - \frac{1}{(\sin \theta)^2} \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_L}$$

Puede apreciarse en la Ec. (8) que la ganancia mecánica se ve afectada por la relación entre las deformaciones del instrumento y de la estructura $\varepsilon_l / \varepsilon_L$.

Si se relaciona las deformaciones con esfuerzos, entonces la Figura 3 se transforma en la Figura 4a), en donde se considera que el segmento del instrumento de longitud l tiene una rigidez K_c y el de longitud h , K_p .

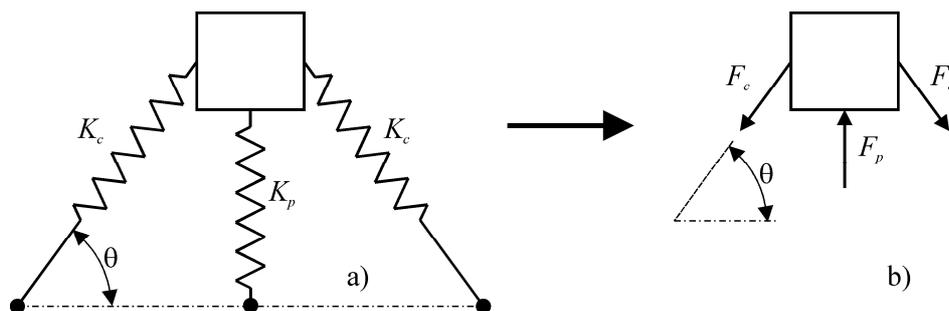


Figura 4: Modelo elástico del instrumento.

De esta manera, la fuerza que hace cada segmento viene dada por

$$\begin{aligned} F_p &= K_p \Delta_h = K_p h |\varepsilon_h| \\ F_c &= K_c \Delta_l = K_c l |\varepsilon_l| \end{aligned} \quad (9)$$

Si se realiza una sumatoria de fuerzas verticales, (Figura 4b), se llega a que

$$\sum F_v = 2F_c \sin \theta - F_p = 0 = 2K_c l |\varepsilon_l| \sin \theta - K_p h |\varepsilon_h| \Rightarrow |\varepsilon_l| = \frac{1}{2 \sin \theta} \frac{K_p h}{K_c l} |\varepsilon_h| \quad (10)$$

Considerando que el signo de ε_l es opuesto al de ε_h y reemplazando (10) en (8), se obtiene

$$\begin{aligned} \varepsilon_h \left[1 + \frac{1}{2(\sin \theta)^3} \frac{K_p h}{K_c l} \right] &= -\frac{1}{(\tan \theta)^2} \varepsilon_L \\ \Rightarrow GM = \left| \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_L} \right| &= \frac{1}{(\tan \theta)^2 \left[1 + \frac{1}{2(\sin \theta)^3} Flex \right]} \end{aligned} \quad (11)$$

donde $Flex = \frac{K_p h}{K_c l}$ indica que a medida que el segmento de longitud h es menos rígido y más corto, se tienen mayor sensibilidad. En el límite, cuando $Flex = 0$, la Ec. (11) se convierte en la Ec. (6). Por el contrario, al alargar el segmento de longitud h y aumentar su rigidez, la sensibilidad decrece. En la Figura 5 se aprecia este efecto.

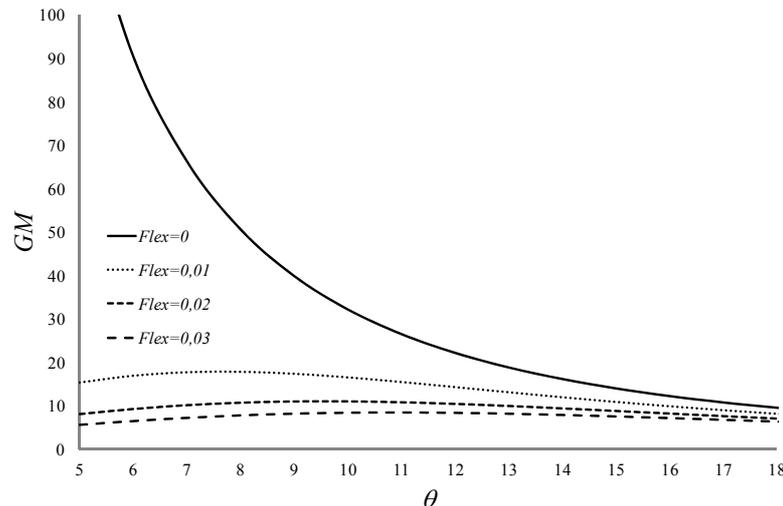


Figura 5: Ganancia mecánica del instrumento en función del ángulo y de la rigidez de las partes.

Se destaca que al considerar la rigidez de las distintas partes del instrumento, la sensibilidad del mismo disminuye sensiblemente y puede encontrarse un máximo de sensibilidad para cierto ángulo finito, relativamente pequeño (para $Flex=0,01$, $\theta_{GMmax} \approx 7,5^\circ$).

4.1 Diseño ensayado y análisis numérico de sensibilidad

Según el análisis previo, el dispositivo debe tener un valor de $Flex = \frac{K_p}{K_c} \frac{h}{l}$ lo más bajo posible. Esto es, una estructura muy rígida con la zona donde se adhieren las galgas muy flexible. No obstante, debe notarse que en el análisis previo la geometría no impone restricciones a la generación de un Δ_θ como consecuencia de la aplicación de un Δ_L . Cualquier resistencia o rigidez del instrumento para producir un Δ_θ tiene el mismo efecto que una mayor rigidez en el segmento donde se adhieren las galgas y, por ende, implica un valor de $Flex$ mayor. Por ello, la estructura rígida debe contemplar el giro “libre” del segmento de longitud l . En la Figura 6 se muestra un esquema del instrumento diseñado con el criterio descrito.

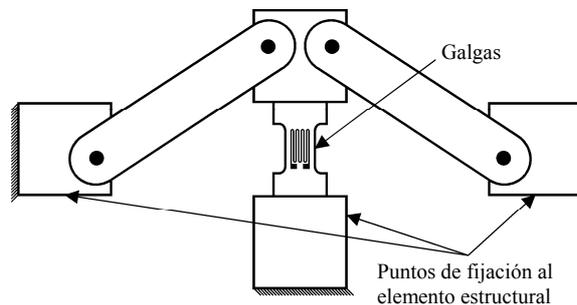


Figura 6: Esquema del instrumento bajo el criterio descrito.

Para obtener la factibilidad del diseño, se reemplazan las articulaciones por estrechamientos y se agregan varios segmentos paralelos para lograr un valor de $Flex$ acotado. Con el objetivo de poder aumentar la sensibilidad mediante el empleo de un puente completo como el de la Fig. 1b), se prolonga el segmento donde se adhieren las galgas hasta otro punto de anclaje, como se muestra en la Figura 7. Puede apreciarse que el elemento en el que se adhieren las galgas es un elemento postizo de muy baja rigidez, situado por encima de la estructura del instrumento. Este postizo es de un material de muy baja rigidez.

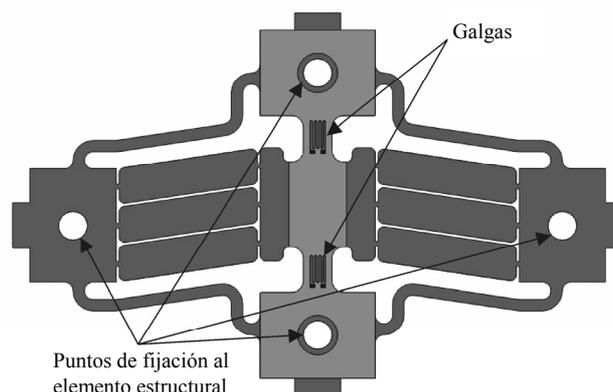


Figura 7: Diseño final del instrumento.

Esta configuración seleccionada ha sido sometida a un estudio numérico mediante el empleo de un software comercial. Las dimensiones finales y las relaciones entre ellas, han sido fruto de un trabajo de optimización con la finalidad de maximizar GM . El estudio de deformaciones consiste en “adherir” el instrumento a un elemento estructural sometido a esfuerzo. Por simplicidad, se ha considerado tracción. Nótese que los segmentos donde se fijan los strain gages concentran la deformación, generando un elevado valor de GM (Figura

8). Asimismo, puede apreciarse que la deformación en ambos segmentos no es igual como producto de la contracción producida por Poisson en el elemento estructural que, de un lado es aditiva y del otro, sustractiva.

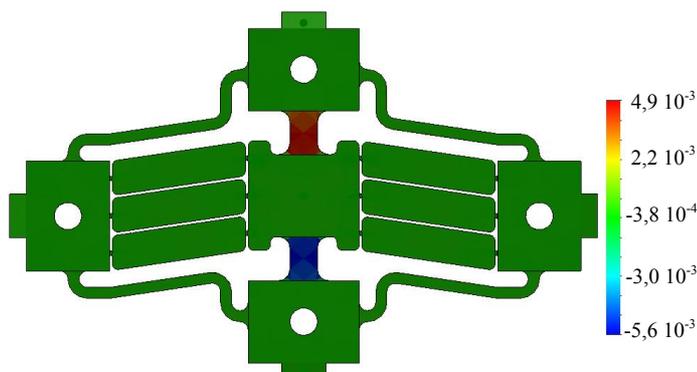


Figura 8: Ensayo estático del instrumento adherido a un elemento estructural bajo tracción.

La Figura 9 muestra la variación de sensibilidad con el ángulo θ manteniendo el resto de las dimensiones constantes. Se observa que, al igual que en la Fig. 5, se presenta un máximo para la sensibilidad. La misma fue determinada según la Ec. (3) con cuatro galgas activas.

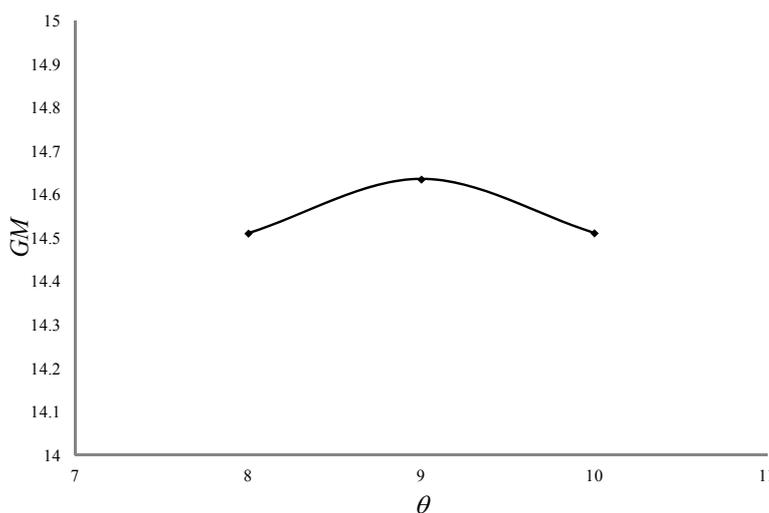


Figura 9: Sensibilidad del instrumento en función del ángulo.

4.2 Análisis térmico

En trabajos previos (Vignolo *et al.*, 2010, 2011) se ha estudiado la importancia de la uniformidad de temperatura entre el elemento estructural y el instrumento. Bajo esa premisa, el diseño de la Fig. 7 se ha desarrollado manteniendo un área de contacto importante entre ambos, minimizando su diferencia de temperatura en fenómenos transitorios. No obstante, puede inferirse que en este diseño la deriva térmica estará determinada por cuán diferente es la dilatación de la estructura y de la ocurrida en el sensor dado que no se ha dispuesto una configuración que anule este fenómeno. Es decir, en el régimen estacionario, la deriva térmica estará íntimamente relacionada con los coeficientes de dilatación de los materiales involucrados. Si ambos, instrumento y estructura son del mismo material, la deriva tiende a ser nula, mientras que a medida que aumenta la discrepancia entre los coeficientes de dilatación, aumenta la deriva. Por ello es importante tener conocimiento de los materiales de ambas partes. No obstante, puede usarse un sensor con el mismo principio de amplificación, que mida en dos direcciones perpendiculares de la estructura para que la derivada térmica

pueda cancelarse (siempre que el material estructural sea isótropo). Sin embargo, el objetivo de este trabajo es introducir la geometría y su desempeño, por lo que no se profundizará sobre estas variantes.

En la Figura 10 se aprecia la deformación inducida por un aumento de temperatura en el sistema: a) con materiales iguales en el instrumento y la estructura; b) con materiales diferentes.

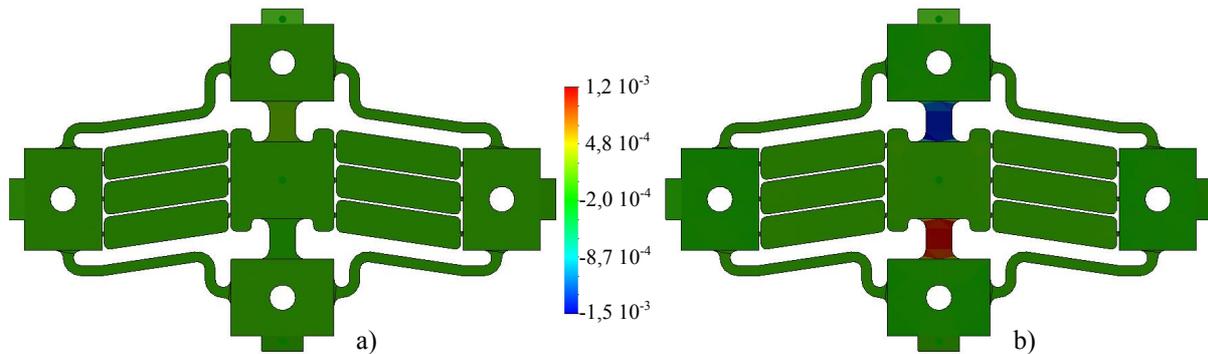


Figura 10: Deformaciones inducidas por un aumento de temperatura en el sistema.

5 MEDICIONES EXPERIMENTALES

Con la finalidad de ensayar el desempeño del diseño presentado, se construyeron prototipos para someterlos a ensayos de laboratorio y de campo. Los primeros, para verificar la deriva térmica en condiciones controladas de temperatura. Los segundos, para verificar la sensibilidad del dispositivo. Se ensayaron en simultáneo, en ambas ocasiones, un instrumento comercial junto con el prototipo. El instrumento comercial utilizado como parámetro comparativo se denominará dispositivo de referencia. Este dispositivo cuenta, por diseño, con compensación térmica.

Los prototipos fueron fabricados con acero al carbono y ensayados en estructuras, también, de acero al carbono. Sin embargo, no se tiene certeza de la composición exacta en ninguno de los casos. En la Figura 11 se muestra uno de los prototipos construidos, sin el elemento elástico en donde se adhieren las galgas.

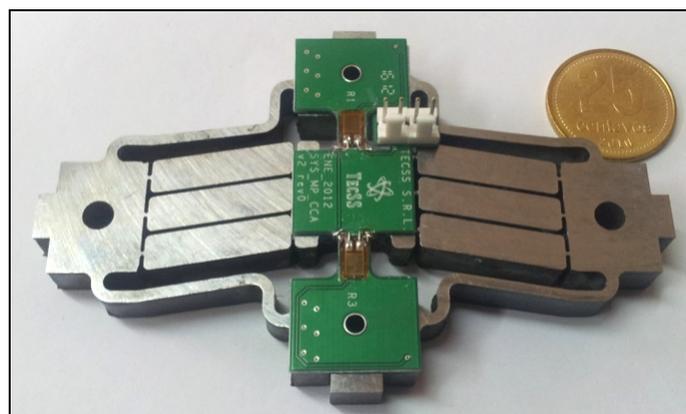


Figura 11: Imagen de uno de los prototipos construidos para los ensayos.

5.1 Ensayos Térmicos de Laboratorio

Para determinar la deriva térmica del instrumento, se lo ensayó adherido a una porción de perfil IPN-500 en condiciones controladas de temperatura y carga nula. Se registraron simultáneamente la temperatura y las señales de los dos dispositivos: el prototipo y el de

referencia. En la Figura 12 se muestran los resultados de estos ensayos. Se observa que la deriva registrada por el prototipo supera a la de la referencia. Esto puede originarse por la discrepancia entre los materiales de la estructura y del prototipo.

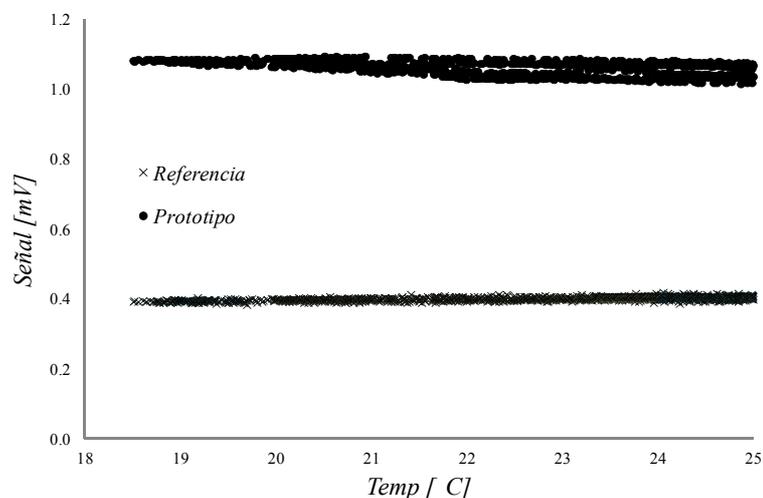


Figura 12: Deriva térmica del prototipo y del instrumento de referencia en condiciones de laboratorio.

5.2 Ensayos de Campo

Los mismos dispositivos, el prototipo y el de referencia, fueron ensayados en condiciones de operación sobre la viga de un aparato individual de bombeo mecánico de petróleo (AIBM) con el objetivo de determinar la ganancia del diseño presentado. En la Figura 13 se muestran las señales registradas en función del tiempo para ambos dispositivos. Como las cargas ejercidas por los AIBM son cíclicas, se tomaron sus valores máximos y mínimos. Se observa que, en este caso, el prototipo ha mantenido los niveles de carga muy estables. Esto puede ser causado por la alta sensibilidad del diseño, sumada a la coincidencia de los materiales del instrumento y de la viga.

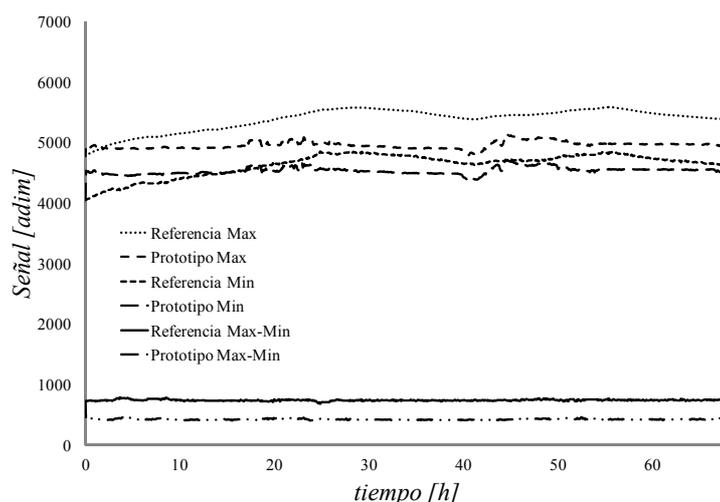


Figura 13: Señales de los dispositivos ensayados sobre un AIBM.

Las simulaciones numéricas de la comparación de la sensibilidad entre el prototipo y la referencia arrojaron una relación $\frac{señal_{prototipo}}{señal_{referencia}} = 7,16$, mientras que en los ensayos de logró una relación de 5,29.

6 CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra los fundamentos del diseño de un sensor de deformación con alta ganancia y baja deriva térmica. Se basa en una geometría muy sencilla que se adapta para cumplir con los requisitos específicos de la aplicación y con las limitaciones de los procesos de fabricación.

Los resultados de las simulaciones numéricas fueron acordes a los obtenidos en el estudio analítico simplificado. Del mismo modo, los ensayos experimentales han demostrado la alta sensibilidad del diseño. No obstante, la estabilidad térmica del dispositivo presentado queda determinada principalmente por la uniformidad de los materiales involucrados. Esto puede subsanarse con configuraciones más elaboradas, basadas en la misma geometría. Sin embargo, en los ensayos de campo, el prototipo se mostró muy estable ante los estímulos térmicos.

El proceso de fabricación de los prototipos ha resultado relativamente sencillo y económico, más aún si se lo compara con el costo de los dispositivos comerciales.

Por lo expresado, puede deducirse que el dispositivo de estudio cumple satisfactoriamente con los objetivos propuestos y presenta un horizonte alentador ya sea para ensayos a escala piloto o como base para futuros diseños.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Sr. Orlando Herrera por su desinteresada contribución y dedicación en la fabricación de los prototipos ensayados.

REFERENCIAS

- Alzate Rodríguez, E.J., Montes Ocampo, J.W. y Silva Ortega, C.A., Medidores de Deformación por Resistencias: Galgas Extensiométricas, *Scientia Et Técnica*, Vol. XIII-N° 34, pp.7-12, 2007.
- Collet, C.V. y Hope, A.D., *Mediciones en Ingeniería*, Gustavo Gili S.A., 1976.
- Feodosiev, V.I., *Resistencia de Materiales*, Mir, 1972.
- Figliola, R.S. y Beasley, D.E., *Mediciones Mecánicas*, Teoría y Diseño, Alfaomega, 2003.
- Flores, G.M, Hecker, R.L., Dalhaye, E. y Guzmán, J., Diseño Preliminar de una Celda de Carga Para Maquinado, *Mecánica Computacional*, Vol. XXV, pp.1347-1355, 2006.
- Hecker, R.L., Guzmán, J.A., Flores, G.M. y Vicente, D.A., Fabricación y Ensayo Experimental de un Dinamómetro Para Torneado, *Actas del 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica y Electromecánica*, Cusco (Perú), 2007.
- Karabay, S., Design Criteria for Electro-Mechanical Transducers and Arrangement for Measurement of Strains Due to Metal Cutting Forces Acting on Dynamometers, *Materials and Design*, Vol XXVIII, pp. 496–506, 2007.
- Khan, A.S. and Wang, X., *Strain Measurements and Stress Analysis*, Prentice Hall, 2001.
- Vignolo, G.G. y Vázquez, J.A., Desarrollo de un Medidor de Deformación Paralelo No Intrusivo Para la Determinación de Cargas en Vigas, *actas del I CAIM*, 2008.
- Vignolo, G.G. y Vázquez, J.A., *Medidor de Deformación en Elementos Estructurales*, Patente Arg. En trámite N°Tr.:20127 - Ex.:20090103772 (TECSS SRL:85%, UNPSJB:15%), 2009.
- Vignolo, G.G., Vázquez, J.A., y Soto, A.J., Sistemas de Compensación Térmica Para Mediciones de Deformación en Elementos Estructurales Sometidos a Esfuerzos - Parte 1: Fenómeno físico, *actas del IICAIM*, 2010.
- Vignolo, GG., Gómez, R., Llansa, M. y Vázquez, J.A., Modelado de la Influencia Térmica Sobre Sensor de Deformación, *Mecánica Computacional*, Vol XXX, pp. 2559-2569, 2011.

Vishay Precision Group, *Strain Gage Thermal Output and Gage Factor Variation with Temperature*, Document Number: 11054, www.micro-measurements.com, Revision 15-Sep-2010.

Vishay Precision Group, *Measurement of Thermal Expansion Coefficient Using Strain Gages*, Document Number: 11063, www.micro-measurements.com, Revision: 01-Nov-2010.

Vishay Precision Group, *Errors Due to Wheatstone Bridge Nonlinearity*, Document Number: 11057, www.micro-measurements.com, Revision 19-Nov-2010.