

## MODELADO DE LA INFLUENCIA TÉRMICA SOBRE SENSOR DE DEFORMACIÓN

**Gustavo G. Vignolo<sup>a,b</sup>, Rodolfo R. Gómez<sup>a</sup>, Matías Llansa<sup>a</sup>, y José A. Vázquez<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> *Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Ruta Prov. N° 1, Km. 4 – 9000 – Comodoro Rivadavia - Chubut, ARGENTINA, [gvignolo@plapiqui.edu.ar](mailto:gvignolo@plapiqui.edu.ar)*

<sup>b</sup> *Departamento de Desarrollo Técnico, Tecnología en Sistemas y Servicios S.R.L, Álvarez Jonte 158, Km. 5 -9000 - Comodoro Rivadavia - Chubut, ARGENTINA*

**Palabras Clave:** Strain gage, deformación, dilatación térmica.

**Resumen:** El diseño de medidores de deformación en elementos estructurales demanda, entre otros requerimientos, la necesidad imperiosa de poder discernir entre deformaciones provocadas por las sollicitaciones de interés, y aquéllas asociadas a factores ajenos tales como la dilatación térmica.

El grado de compensación térmica de un sensor de este tipo está relacionado con su capacidad de medir deformaciones debidas a esfuerzos amén de la presencia de variaciones de temperatura. En este sentido, el sensor óptimo sería aquél capaz de lograr una señal de salida totalmente libre de distorsión por efectos térmicos. En la práctica, si bien esto es posible, su implementación requiere el compensado individual de cada elemento sensor, dificultando y encareciendo su fabricación en serie. Una alternativa factible radica en la medición y procesamiento simultáneo de la temperatura para corregir la señal de salida del sensor.

En este trabajo se presenta el estudio de la respuesta a variaciones térmicas de un dispositivo de medición de deformación adherido a la superficie de una viga. El sistema de interés se compone de una viga de gran tamaño en la que se dispone un sensor de deformación en paralelo y un termómetro que determina la temperatura del entorno. Las masas involucradas en cada uno de los elementos hacen que las variaciones en el tiempo de sus temperaturas sean muy distintas y, en consecuencia, también lo son las dilataciones térmicas asociadas. Para comprender y compensar este fenómeno, se aborda en primera instancia un modelo teórico y su solución analítica. De este análisis se infiere la respuesta del sistema. Posteriormente se presenta una simulación computacional más rigurosa. Los resultados obtenidos son comparados con mediciones experimentales del dispositivo en cuestión.

Mediante este análisis se determina la respuesta térmica del sensor y se discuten la aptitud de su diseño.

## 1 INTRODUCCIÓN

El diseño de elementos de medición debe contemplar su estabilidad en todas las condiciones de trabajo. En particular, al tratar sobre 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/o humedad, entre otros (Collet, 1976). De ellas, las variaciones térmicas son las más frecuentes y por ende son 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 presente trabajo se desarrolla el estudio de la respuesta de un medidor de deformación ante estímulos térmicos externos. En particular, se estudia el comportamiento ante un salto escalón en el flujo de calor actuante sobre el sistema. Con el objetivo de ejemplificar el análisis, el estudio se centra sobre el comportamiento de un dispositivo medidor de deformación desarrollado previamente, y descrito en (Vignolo *et al.*, 2008, 2009), aunque la metodología puede extenderse a otras configuraciones. En este trabajo se profundiza el análisis efectuado en (Vignolo *et al.*, 2010), abordando el estudio de una variante optimizada del citado diseño.

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 primera instancia se describe el fenómeno físico que produce la deriva de la señal. Posteriormente se aborda el tratamiento numérico de las ecuaciones gobernantes y se comparan los resultados con mediciones experimentales.

## 2 DISPOSITIVO ANALIZADO

Si bien el detalle del funcionamiento y las especificaciones del dispositivo medidor de deformación analizado pueden encontrarse en (Vignolo *et al.*, 2008, 2009), a continuación se realiza una breve descripción de los elementos que lo conforman.

Puede apreciarse en la Figura 1 que el mismo está constituido por dos partes principales 1 y 2 las cuales tienen incorporados en uno de sus extremos mordazas 3 que lo vinculan a la viga sometida a esfuerzos. Cada una de estas últimas está conformada, además, por un refuerzo postizo 4, un tornillo de apriete 5 y una tuerca 6.

Al enfrentarse los extremos opuestos a las mordazas de las partes principales 1 y 2, dejan un pequeño espacio entre ellas. La probeta 7 de bajo módulo elástico se sujeta a los agujeros 8, uniéndose a las partes principales 1 y 2, y estableciendo un nexo entre los espacios antes mencionados. Sobre los estrechamientos de la probeta 7 se adhieren las galgas

extensiométricas. Los medios aros 9 se sujetan a los agujeros 10 de las partes principales 1 y 2, dándole robustez al dispositivo. Una coraza puede cubrir a estos últimos con el objetivo de proteger contra el medio a los elementos que están en su interior. Un agujero en esta última permite la salida de los conductores que transmiten la señal a un equipo electrónico.

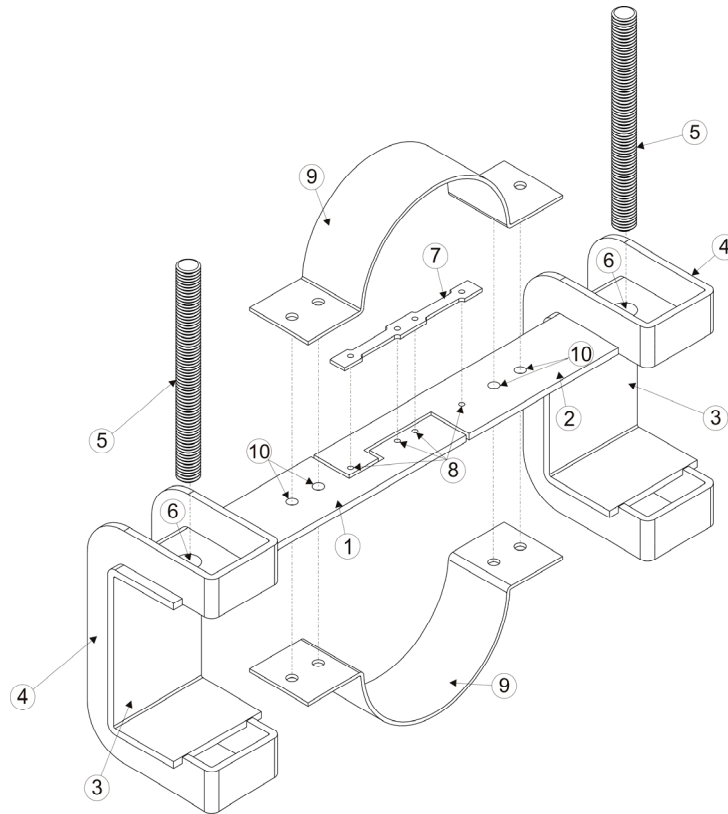


Figura 1: Esquema del dispositivo medidor de deformación analizado previamente.

El estudio del comportamiento ante estímulos térmicos efectuado sobre el dispositivo descrito en la Fig.1 (Vignolo *et al.*, 2010) arrojó como resultado un marcado retardo en la compensación de la señal de salida del mismo ante un salto escalón de aporte de calor. Esto se debe a la gran diferencia de masas térmicas entre el dispositivo y la viga a la que se sujeta, sumada a una deficiente transmisión de calor entre ambos. Como resultado, las temperaturas de dispositivo y viga son muy diferentes en un estado transitorio prolongado, ocasionando la mencionada deriva.

## 2.1 Dispositivo Modificado

En el afán de optimizar la respuesta del dispositivo, se propone incrementar la transferencia de calor entre éste y la viga con el objetivo de que las temperaturas de ambos permanezcan lo más próximas que sea posible. Por ello, de los elementos mostrados en la Fig. 1 se conservan las partes 1 y 2 con sus agujeros 8, y la probeta 7. A estos elementos se suma una placa inferior, como se muestra en la Fig. 2. Esta placa se suelda en sus extremos a las partes 1 y 2, y se adhiere por su superficie inferior a la viga. Sus funciones son la de transferir la deformación de la viga a las partes 1 y 2, a la vez que sirve de transmisor de calor entre éstas y la viga.

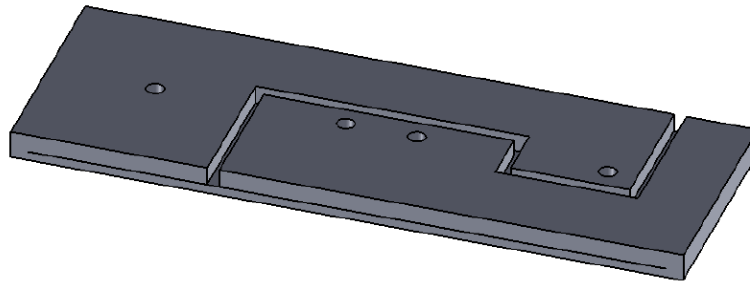


Figura 2: Esquema del dispositivo medidor de deformación modificado.

### 3 MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO

Para el estudio de la respuesta del medidor de deformación mostrado en la Fig. 2, se realiza el análisis de transmisión de calor. La ecuación gobernante del sistema es (Carslaw and Jaeger, 1959):

$$\alpha \nabla^2 \theta = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

donde  $\alpha = \frac{k}{\rho c_v}$ , siendo  $k$  la conductividad térmica del sólido,  $\rho$  su densidad y  $C_v$  su calor específico.  $\theta$  es la temperatura adimensional definida como:

$$\theta = \frac{T - T_a}{T_a} \quad (2)$$

donde  $T_a$  es la temperatura ambiente.

Si se considera un modelo bidimensional del dispositivo, considerando sólo las variaciones térmicas a lo largo ( $x$ ) y en el espesor de la misma ( $z$ ), y despreciando las correspondientes a su ancho ( $y$ ), la solución de la Ec.(1) queda determinada por:

$$\theta = \kappa_1 e^{(a_1 C_1 + a_2 C_2 - \sqrt{C_1 x} - \sqrt{C_2 z})} \left[ e^{(2\sqrt{C_2 z})} \kappa_2 \kappa_3 + e^{(2\sqrt{C_1 x})} \kappa_4 \kappa_5 + e^{(2\sqrt{C_1 x} + 2\sqrt{C_2 z})} \kappa_3 \kappa_5 + \kappa_4 \kappa_2 \right] \quad (3)$$

donde  $\kappa_1$  a  $\kappa_5$  son constantes de integración mientras que  $C_1$  y  $C_2$  son constantes arbitrarias fruto de la separación de variables. Puede apreciarse en la Ec. (3) que la temperatura del dispositivo muestra una ley de variación temporal exponencial. Esto permite inferir una respuesta inicial pronunciada que se hace asintótica a algún valor a medida que transcurre el tiempo. Las condiciones de borde para este modelo quedan definidas por:

$$\theta_{(0,x,z)} = 0, \quad \theta_{(t,x,0)} = \theta_V, \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{(t,x,H)} = q - \frac{h}{k} \theta, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{(t,0,z)} = \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{(t,L,z)} = 0 \quad (4)$$

en donde se considera que su superficie inferior, que está en contacto con la viga, mantiene la temperatura de la misma ( $\theta_V$ ), Tanto en la cara superior del dispositivo como de la viga, se impone un escalón de aporte de calor  $q$  y se permite la convección al medio a través de un coeficiente de convección  $h$ . En este caso, se consideran que ambos extremos del dispositivo son adiabáticos.  $L$  y  $H$  representan el largo y espesor del dispositivo, respectivamente.

Si bien podría efectuarse el mismo análisis para la viga, dada su relación de aspecto, se emplea un modelo unidimensional para modelarla, el cual tiene solución analítica que, si se

consideran los extremos de la viga adiabáticos, queda determinada por:

$$\theta = \frac{C}{\beta} \left( e^{\frac{\beta t}{\gamma}} - 1 \right) e^{-\frac{\beta t}{\gamma}} \quad (5)$$

donde  $\beta = \frac{h}{B}$ ,  $\gamma = \rho C_v$ , y  $C = \frac{1}{2B} \frac{q}{T_a}$ , siendo  $2B$  es el espesor de la viga (25mm).

Esta, es una ley temporal asintótica en la cual después de un estado transitorio se obtiene el estado permanente que depende de parámetros físicos, geométricos, de las condiciones ambientales y del aporte de calor. Esta ley se emplea como condición de borde en la superficie inferior en el modelado del dispositivo.

En la Tabla 1 se muestran las propiedades físicas del dispositivo y de la viga.

h [W/(m <sup>2</sup> K)]	6
k [W/(mK)]	45
C <sub>v</sub> [J/(KgK)]	500
λ [1/K]	11 · 10 <sup>-6</sup>
ρ [Kg/m <sup>3</sup> ]	7800

Tabla 1: Características del material del dispositivo y viga.

#### 4 MODELADO NUMÉRICO

Para el modelado numérico del comportamiento del dispositivo, se ha empleado el software FlexPDE, en su versión estudiantil la cual es gratuita aunque con la consecuente limitación en la cantidad de elementos disponibles. No obstante, para el problema abordado, esto no implicó un inconveniente.

FlexPDE es un software desarrollado para solucionar ecuaciones diferenciales parciales de 1° o 2° orden bien sea en una, dos o tres dimensiones y aunque utiliza por defecto geometría cartesiana, es posible incorporar otras geometrías. Permite, además resolver problemas en régimen estacionario y transitorio, y la cantidad de ecuaciones simultáneas queda limitada únicamente por la capacidad de procesamiento del CPU. Las ecuaciones introducidas pueden ser o no lineales y el manejo del paquete puede entenderse con relativa facilidad, considerando la amplia gama de aplicabilidad que puede presentar en diferentes ambientes ya sea académicos o de aplicación ingenieril (Bäckström, 2005).

En la Fig.3 se muestra el modelo creado en FlexPDE, el cual contiene 1603 nodos. Dado que las partes superiores fueron generadas aparte de la placa inferior, el programa permite imponer una resistencia de contacto entre las partes para limitar la conducción. Se han efectuado pruebas con y sin resistencia de contacto con el objetivo de evaluar la incidencia que superficies deterioradas o sucias tienen en la respuesta del sistema.

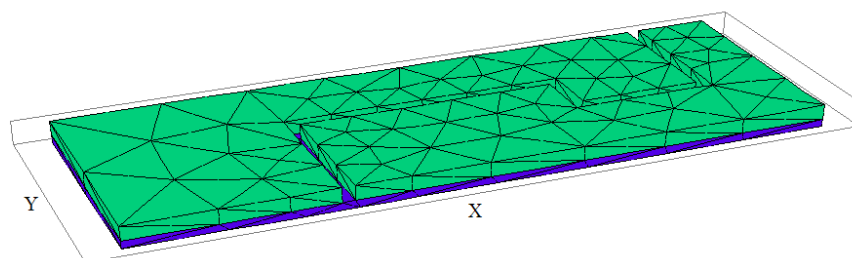


Figura 3: modelo creado en FlexPDE.

#### 4.1 Resultados de la Simulación

A continuación se presentan los perfiles de temperatura obtenidos para el dispositivo con un escalón de aporte de calor de  $1000\text{w/m}^2$ . En las Figs. 4 a 6 se muestran las simulaciones sin resistencia de contacto hasta  $t_{\text{max}}=10\text{s}$ , mientras que en las Figs. 7 a 9 se muestran las correspondientes a  $t_{\text{max}}=50000\text{s}$ .

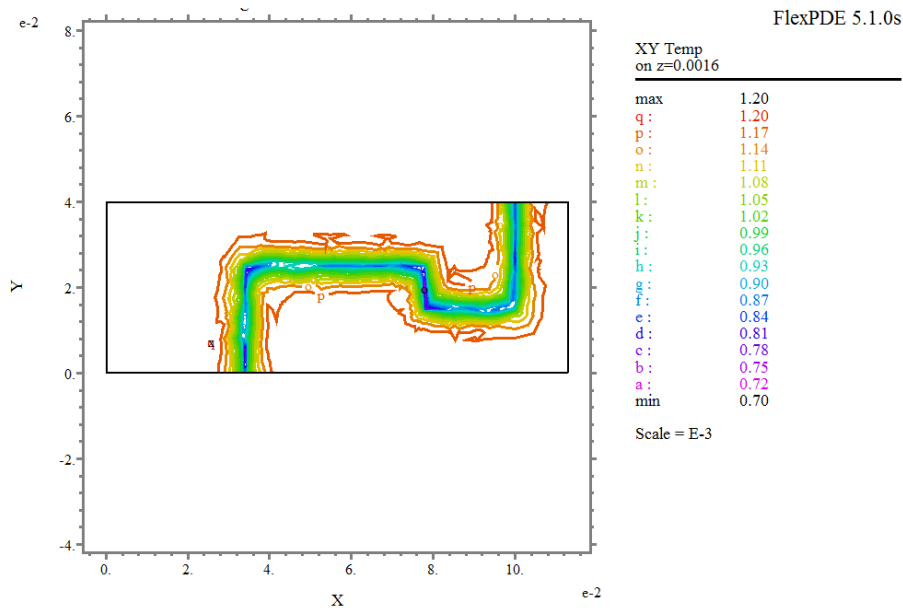


Figura 4: Distribución de temperatura adimensional en la cara superior de la placa inferior ( $t_{\text{max}}=10\text{s}$ ).

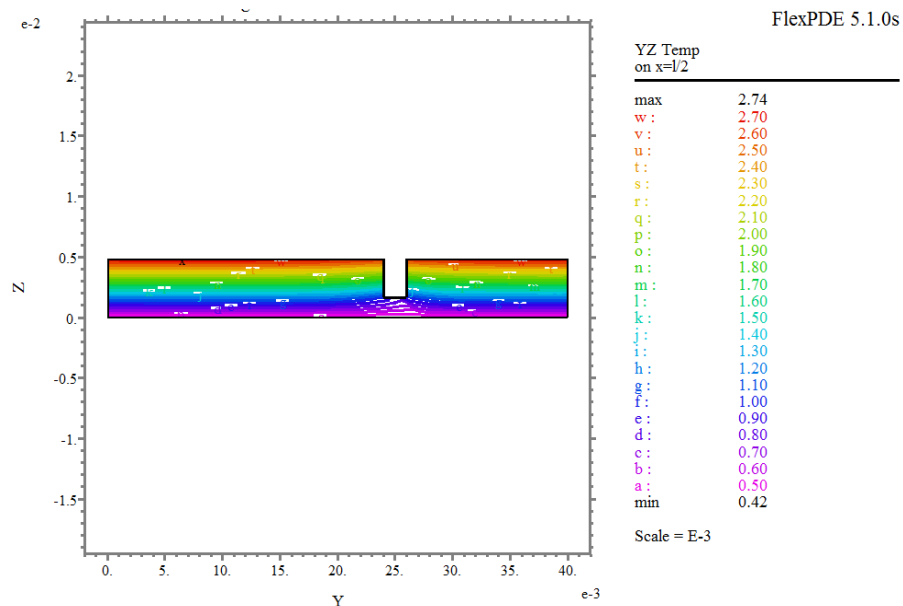


Figura 5: Distribución de temperatura adimensional en el espesor del dispositivo ( $t_{\text{max}}=10\text{s}$ ).

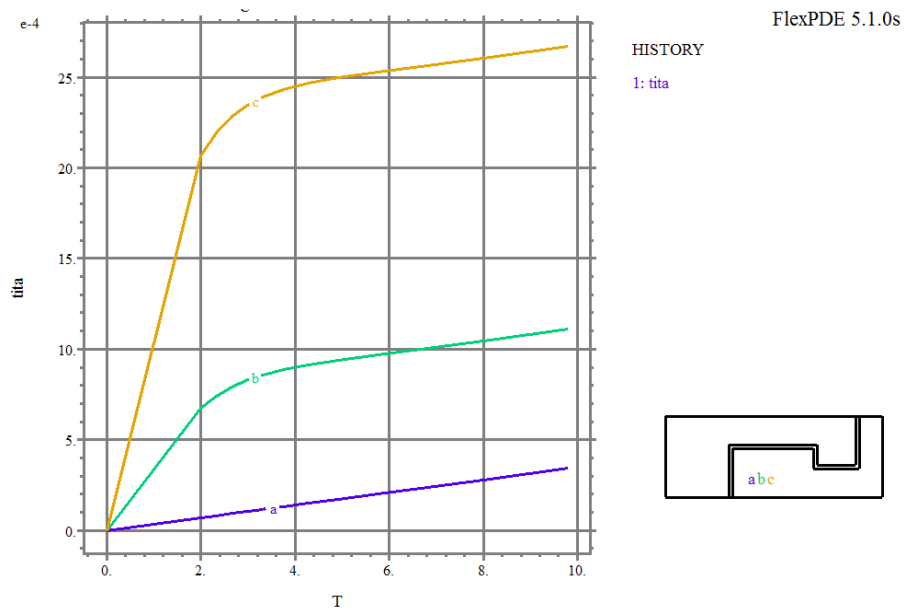


Figura 6: Evolución de la temperatura adimensional en puntos de las superficies inferior (a), media (b) y superior (c) ( $t_{max}=10s$ ).

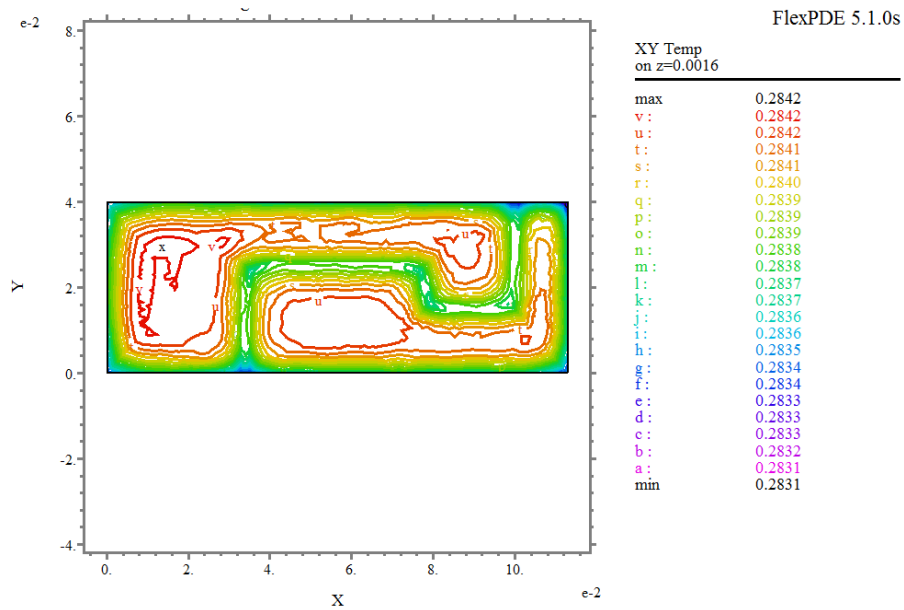


Figura 7: Distribución de temperatura adimensional en la cara superior de la placa inferior ( $t_{max}=50000s$ ).

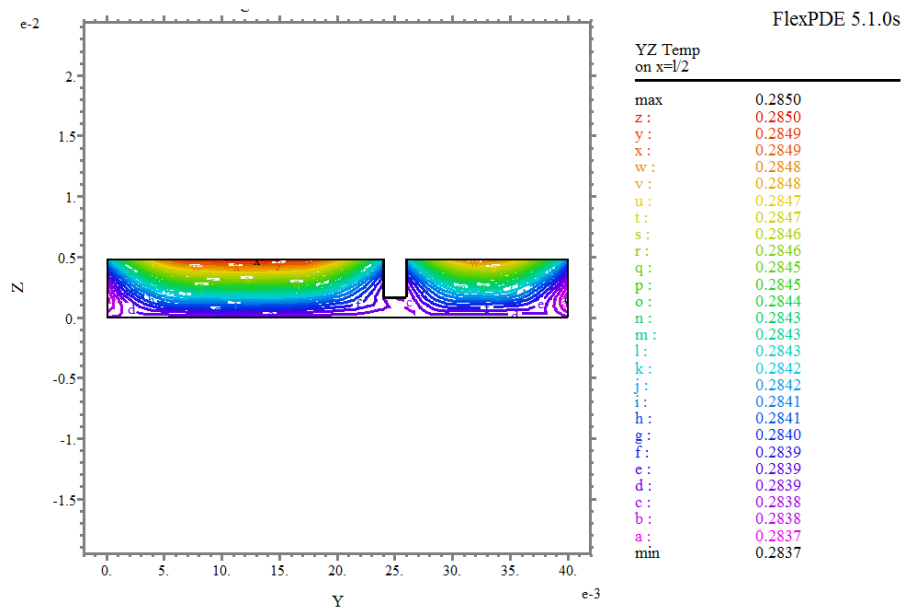


Figura 8: Distribución de temperatura adimensional en el espesor del dispositivo ( $t_{\max}=50000s$ ).

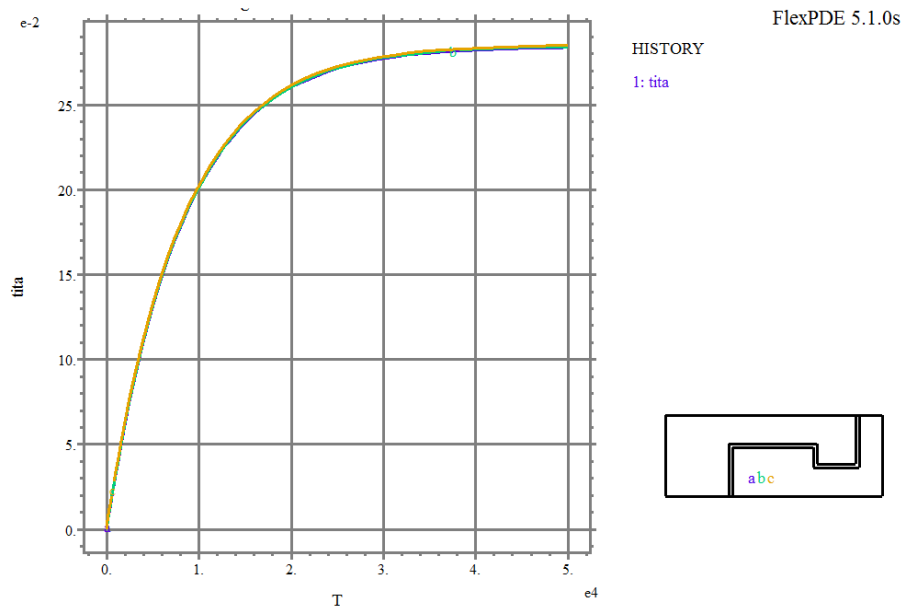


Figura 9: Evolución de la temperatura adimensional en puntos de las superficies inferior (a), media (b) y superior (c) ( $t_{\max}=50000s$ ).

A grandes rasgos, puede apreciarse en las Fig. 4 a 9 que, la respuesta del dispositivo es sumamente rápida, alcanzando un gradiente térmico en su espesor que se mantiene constante pasados unos pocos segundos desde el salto escalón (este gradiente es el que mantiene el flujo de calor por conducción entre la viga y el dispositivo). Transcurrido un tiempo mayor, el comportamiento del sistema queda totalmente regido por la lenta respuesta de la viga.

#### 4.2 Análisis de Sensibilidad con respecto a los parámetros principales del modelo

El modelado del sistema con un mayor aporte de calor ha resultado en una mayor diferencia de temperaturas con respecto al medio ambiente, mientras que el aumento en la conductividad térmica del material arrojó un menor tiempo de repuesta. Estos resultados



muestran consistencia respecto de lo que debería esperarse ante dichos cambios (Bejan and Kraus, 2003)

Otros resultados interesantes son la baja sensibilidad del sistema a los cambios del coeficiente convectivo y la respuesta ante la consideración de resistencia de contacto, la cual se muestra en la Figura 10.

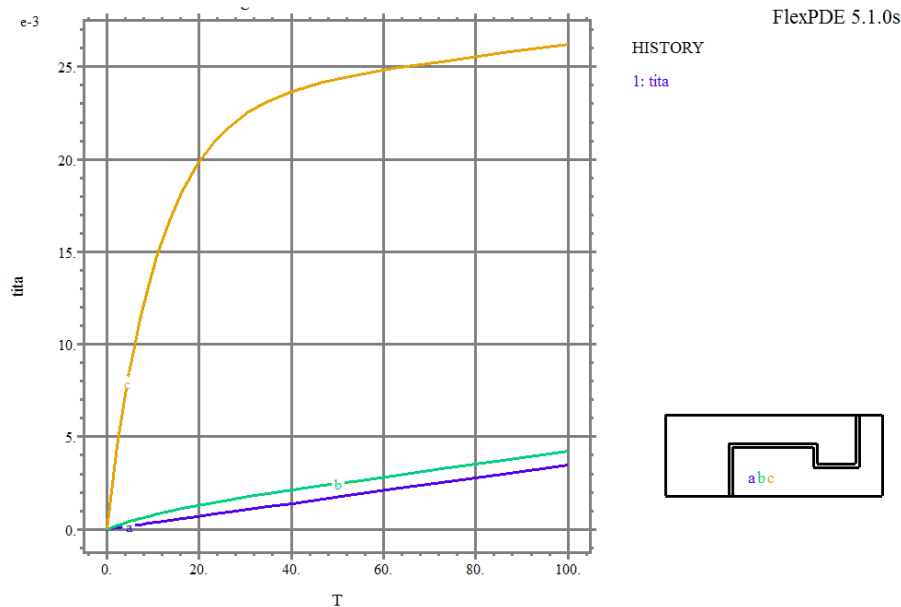


Figura 10: Evolución de la temperatura adimensional en puntos de las superficies inferior (a), media (b) y superior (c) ( $t_{\max}=100s$ ).

Puede apreciarse en la Fig. 10 que, como cabría esperar, tanto la temperatura de la superficie superior como el tiempo de respuesta se incrementan respecto de lo mostrado en la Fig. 6.

## 5 MEDICIONES EXPERIMENTALES

Con la finalidad de verificar la estabilidad de la señal de salida del diseño analizado, se construyó un prototipo y se lo ensayó adherido a una porción de viga en condiciones controladas de temperatura y carga nula. Lamentablemente, reproducir las condiciones de los ensayos numéricos resultó imposible dada la dificultad de controlar un aporte de calor como el simulado. No obstante, se realizaron experimentos de respuesta ante cambios en la temperatura ambiente. Se monitorearon simultáneamente dicha temperatura y la temperatura de la viga en proximidades del dispositivo, y la señal de salida del mismo. Toda señal registrada distinta de cero implica una deformación aparente no asociada a un estado de carga de la viga. En la Figura 11 se muestran las tres señales mencionadas en presencia de un calentamiento gradual del ambiente, seguido de un enfriamiento. Puede apreciarse que la señal del dispositivo permanece estable aún ante grandes cambios en las condiciones del entorno.

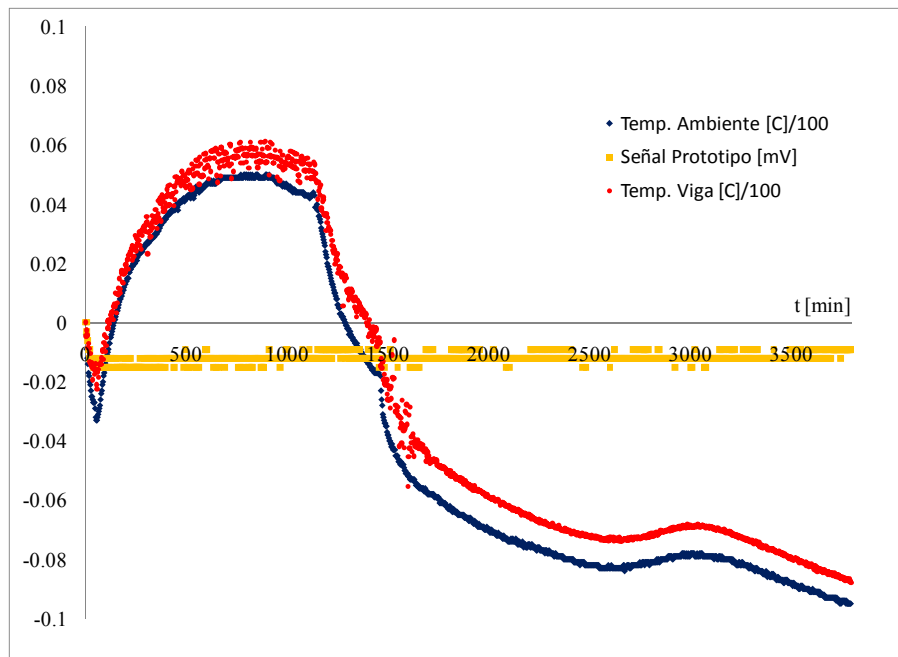


Figura 11: Mediciones experimentales de temperatura y señal del dispositivo.

## 6 CONCLUSIONES

En concordancia con la respuesta inferida de la solución analítica, los resultados de las simulaciones muestran una ley de variación temporal exponencial de la temperatura del dispositivo. Asimismo, el incremento de la transferencia de calor con la viga de este modelo respecto de su versión original produce transitorios de poca amplitud y corta duración en presencia de escalones de aporte de calor. Esto implica que la señal de salida del dispositivo producirá una variación mínima respecto de la señal de base.

Asimismo, los ensayos experimentales han mostrado que variaciones significativas en la temperatura del entorno no ocasionan derivas importantes en la señal del dispositivo.

Por lo expresado, puede deducirse que el dispositivo con las modificaciones propuestas conserva su estabilidad dentro de márgenes estrechos ante estímulos térmicos y presenta un horizonte alentador ya sea para ensayos a escala piloto o como base para futuros diseños.

## REFERENCIAS

- Bäckström, G., *Simple Fields by Finite Element Analysis -Electromagnetism, Heat, Waves, and Fluid: Dynamics in 2D and 3D Using FlexPDE Version*, GB Publishing® and Gunnar Bäckström Malmö, 2005.
- Bejan, A. and Kraus, A., *Heat Transfer Handbook*, John Wiley & Sons, 2003.
- Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., *Conduction of Heat in Solids*, Oxford, 1959.
- 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.
- 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.
- Vishay Precision Group, *Strain Gage Thermal Output and Gage Factor Variation with Temperature*, Document Number: 11054, [www.micro-measurements.com](http://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](http://www.micro-measurements.com), Revision: 01-Nov-2010.
- Vishay Precision Group, *Errors Due to Wheatstone Bridge Nonlinearity*, Document Number: 11057, [www.micro-measurements.com](http://www.micro-measurements.com), Revision 19-Nov-2010.