



# ESTUDIO ANALÍTICO, NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE LA INFLUENCIA TÉRMICA EN MEDICIONES DE DEFORMACIÓN SOBRE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

GUSTAVO G. VIGNOLO<sup>1,2,3</sup>, JOSÉ A. VÁZQUEZ<sup>3</sup>, AXEL J. SOTO<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco  
Facultad de Ingeniería

Ruta Prov. N° 1, Km. 4 – (9000) Comodoro Rivadavia – Argentina

<sup>2</sup>Universidad Nacional del Sur – CONICET

Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI)

Camino La Carrindanga km. 7 – CC 717 – (8000) Bahía Blanca – Argentina

<sup>3</sup>Departamento de Desarrollo Técnico, Tecnología en Sistemas y Servicios S.R.L.

Álvarez Jonte 158, Km. 5, (9000) Comodoro Rivadavia – Argentina

<sup>4</sup>Universidad Nacional del Sur

Dpto. de Ciencias e Ingeniería de la Computación

Av. Alem 1253, (8000) Bahía Blanca – Argentina

(Recibido 2 de julio de 2011, para publicación 24 de septiembre de 2011)

**Resumen** – La medición de deformaciones en elementos estructurales es una tarea que requiere extremas precauciones tanto en el diseño y montaje del elemento de medición como en la interpretación de las lecturas. En general, en el cálculo resistente de estructuras se dimensionan los elementos que la conforman de modo que sean capaces de soportar las cargas aplicadas y que la deformación que éstos sufren no afecte su desempeño normal. Este concepto produce una complicación mayor al momento de medir las deformaciones provocadas por las cargas dado que, como premisa de diseño, tales deformaciones deben ser pequeñas. Como consecuencia, la magnitud de las deformaciones de interés son del mismo orden que las provocadas por factores externos como es el caso de la dilatación térmica. En este trabajo se estudia la manera en que la dilatación térmica afecta las mediciones de deformación sobre una viga sometida a esfuerzos efectuados mediante el uso de un dispositivo específico, y se presentan alternativas para compensar tales mediciones de modo que la lectura final sólo contenga la información deseada. El sistema de interés se compone de una viga de gran tamaño en la que se dispone un instrumento de medición de deformación en paralelo y un termómetro que determina la temperatura del ambiente. 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 presenta en primera instancia el estudio del fenómeno físico que vincula el calor aportado al sistema y las masas y temperaturas de los elementos involucrados. Los resultados obtenidos son contrastados con mediciones de laboratorio. En segunda instancia se aborda el análisis de mediciones experimentales de campo y se propone un modelo computacional basado en la optimización de redes neuronales artificiales para discriminar el esfuerzo de la dilatación térmica.

**Palabras clave** – *Strain gage*, deformación, dilatación térmica, redes neuronales.

## 1. INTRODUCCIÓN

Tanto el diseño de componentes para máquinas y estructuras que soportan carga como el monitoreo de su funcionamiento requieren información sobre la distribución de fuerzas dentro de los mismos. El diseño correcto de dispositivos mecánicos debe considerar la resistencia y deflexiones máximas permisibles [1]. El monitoreo de su funcionamiento debe contemplar que las cargas aplicadas no superen a las de diseño. La mecánica de materiales proporciona la base para predecir las características esenciales del diseño mecánico y suministra la comprensión fundamental del comportamiento de partes sometidas a esfuerzo [1,2]. De este modo, el seguimiento del trabajo de una máquina puede hacerse mediante mediciones específicas en aquéllos elementos más comprometidos.

Si bien existen diversos métodos para determinar el estado de marcha de un equipo, resulta de interés en este trabajo la determinación de esfuerzos mediante la medición de deformación. En particular, el aspecto referente a la comprensión y compensación de deformaciones aparentes, que no existen en el elemento sensado o no son debidas al esfuerzo, 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 [3]. 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 [3].

En el presente trabajo se desarrolla el estudio de la respuesta en la señal generada por 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 [4,5], aunque la metodología puede extenderse a otras configuraciones. En primera instancia se describe el fenómeno físico que produce la deriva de la señal, el cual es contrastado con mediciones de laboratorio. Posteriormente se analizan resultados experimentales de campo y se propone un algoritmo basado en redes neuronales artificiales para compensar este fenómeno.

## 2. DISPOSITIVO ANALIZADO

Si bien el detalle del funcionamiento y las especificaciones del dispositivo medidor de deformación analizado pueden encontrarse en [4,5], a continuación se realiza una breve descripción de los elementos que lo conforman.

Puede apreciarse en la Fig. 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

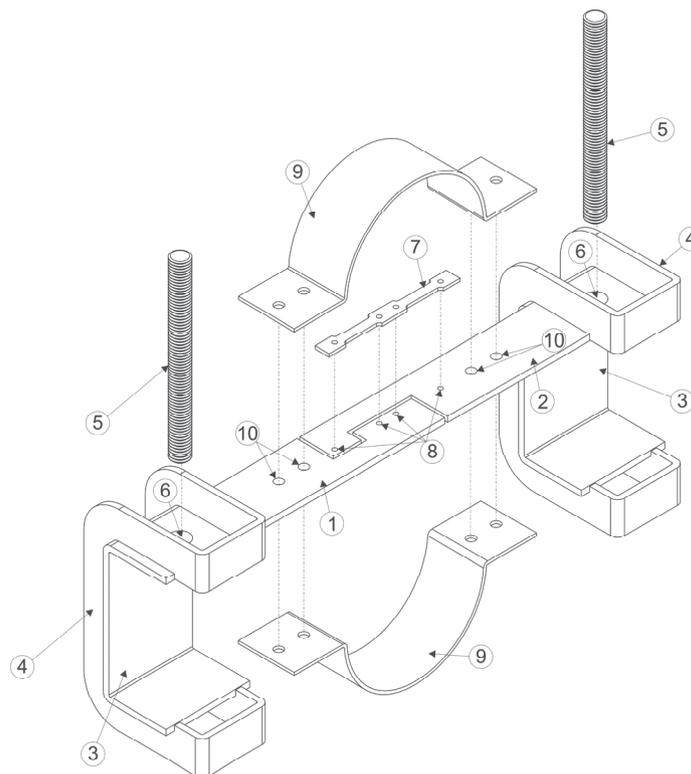


Fig. 1. Esquema del dispositivo medidor de deformación analizado.

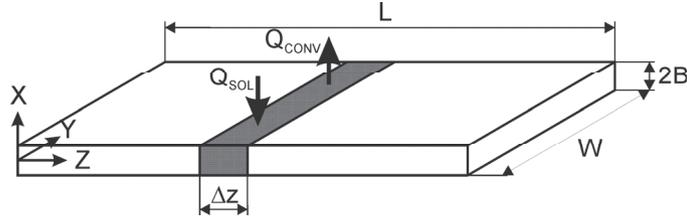


Fig. 2. Modelo de "aleta de enfriamiento" empleado.

una tuerca 6. La parte principal 1 es la "rama corta" que se citará en el presente trabajo, mientras que la parte principal 2 es la "rama larga".

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, uniendo 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.

### 3. MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO

Para el estudio del medidor de deformación mostrado en la Fig. 1 se analiza la estructura del mismo con un modelo simplificado en 1D, basado en la hipótesis de "Aleta de Enfriamiento", en la cual el flujo de calor que atraviesa las superficies laterales puede ser despreciado [6]. El modelo empleado se representa en la Fig. 2.

Si se aplica el balance de energía sobre el volumen sombreado, y se considera que existe flujo de calor por conducción en la dirección axial ( $Z$ ), transmisión por convección ( $Q_{CONV}$ ) en las superficies superior e inferior, y aporte de calor sobre la superficie superior ( $Q_{SOL}$ ) proveniente de una fuente externa, se obtiene para el estado estacionario:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} = \frac{h}{B} (T - T_a) - \frac{1}{2B} q_{SOL} \quad (1)$$

$k$  es la conductividad térmica del sólido,  $h$  es el coeficiente convectivo del fluido que rodea al cuerpo,  $T_a$  es la temperatura del medio circundante, y  $q_{SOL}$  es el flujo de calor externo por unidad de área.

Si se considera la respuesta en el tiempo del sistema, y se adimensionalizan las variables, se obtiene:

$$\gamma \frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - \beta \theta + C, \quad (2)$$

donde

$$\theta = \frac{T - T_a}{T_a}, \text{ es la temperatura adimensional,}$$

$$z = \frac{Z}{L}, \text{ es la coordenada axial adimensional,}$$

$$\alpha = \frac{k}{L^2}, \quad \beta = \frac{h}{B}, \quad \gamma = \rho C_v, \quad \text{y} \quad C = \frac{1}{2B} \frac{q_{SOL}}{T_a}, \text{ siendo } \rho \text{ la densidad del sólido y } C_v \text{ su capacidad calorífica.}$$

Las condiciones de borde para la integración de (2) se muestran en la Fig. 3 junto con el modelo simplificado en 1D de la geometría real una rama del dispositivo, en coordenadas adimensionales.

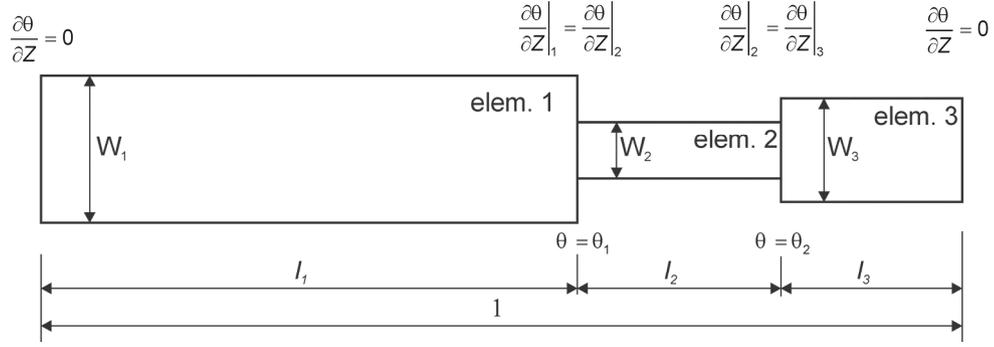


Fig. 3. Esquema simplificado 1D de una rama del dispositivo y condiciones de borde térmicas.

Tabla 1. Dimensiones de los elementos que conforman cada rama del dispositivo.

		Rama Larga	Rama Corta
elem.1	L [mm]	170	192
	L <sub>1</sub> [mm]	104	126
	W <sub>1</sub> [mm]	40	40
elem.2	L <sub>2</sub> [mm]	24	46
	W <sub>2</sub> [mm]	14	14
elem.3	L <sub>3</sub> [mm]	42	20
	W <sub>3</sub> [mm]	24	24

Tabla 2. Propiedades físicas del material del dispositivo y del medio circundante.

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

$l_1 = \frac{L_1}{L}$ ,  $l_2 = \frac{L_2}{L}$ , y  $l_3 = \frac{L_3}{L}$  son las longitudes adimensionales de los respectivos elementos que componen la rama del medidor. Las dimensiones empleadas para realizar los cálculos se detallan en la Tabla 1. El espesor es constante en todo el dispositivo, e igual a  $2B=4$  mm.

Las propiedades físicas tanto del material del medidor (acero) como el del medio circundante (aire), se describen en la Tabla 2.

El valor especificado de  $h$  corresponde a aire en reposo.

Para efectuar la integración de (2) mediante el método de separación de variables se recurre a la sustitución [7]

$$\theta = u_{(z,t)} e^{-\frac{\beta}{\gamma} t} \quad (3)$$

Reemplazando (3) en (2) se obtiene

$$\gamma \frac{\partial u_{(z,t)}}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u_{(z,t)}}{\partial z^2} + C e^{-\frac{\beta}{\gamma} t} \quad (4)$$

que puede reescribirse de la forma

$$\gamma \frac{\partial u_{(z,t)}}{\partial t} - C e^{-\frac{\beta}{\gamma} t} = K_1 = \alpha \frac{\partial^2 u_{(z,t)}}{\partial z^2}, \quad (5)$$

donde  $K_1$  es una constante.

Las ecuaciones (5) se resuelven analíticamente para cada elemento en ambas ramas, aplicando las condiciones de borde mostradas en la Fig. 3, más la condición inicial  $\theta(0, z) = 0$ . Las soluciones de los tres elementos de cada rama quedan acopladas por las condiciones de continuidad de temperatura y derivada en el elemento central. La solución del sistema acoplado requiere la determinación de cuatro constantes por tramo (tres constantes de integración, más la constante  $K_1$ ), y las temperaturas intermedias  $\theta_1$  y  $\theta_2$  [7].

Cabe destacar que como el modelo empleado es unidimensional, no contempla las diferencias de ancho  $W$  entre los elementos. El efecto principal de contar con elementos de distinto  $W$  es que cada uno de ellos cuenta con distinta densidad lineal (masa por unidad de longitud). Para considerar este efecto a lo largo de la rama, se emplea para cada elemento  $i$  una densidad  $\rho_i$  diferente, con el objetivo de incluir en la solución las diversas densidades lineales de los elementos. Los valores empleados surgen de considerar que la densidad por unidad de ancho,  $\varphi$ , es constante a lo largo de la rama. Así,

$$\varphi = \frac{\rho_i}{W_i} \quad (6)$$

Utilizando como referencia el elemento 1, (6) se convierte en

$$\varphi = \frac{\rho_1}{W_1}, \quad (7)$$

donde se considera que  $\rho_1 = \rho$ . Combinando (6) y (7), se determinan las densidades a emplear en cada elemento.

$$\rho_i = \rho \frac{W_i}{W_1}, \quad (8)$$

De manera similar a la empleada en el análisis de las ramas del dispositivo, se ha abordado el estudio de la sección de viga a la cual ésta se sujeta. Para ello se considera una sección plana y se resuelven las ecuaciones (5) utilizando condiciones de borde de transferencia de calor nula en los extremos (extremos adiabáticos). Las propiedades geométricas de la viga se muestran en la Tabla 3, mientras que sus propiedades físicas son las mismas que las especificadas en la Tabla 2.

En las Figs. 4 a 6 se muestra la respuesta de la rama corta ante un salto escalón en el flujo de calor  $q_{SOL}$ . La rama larga presenta un comportamiento similar. En la Fig. 5 se muestra también la respuesta de la viga ante el mismo estímulo.

Puede verse en la Fig. 5 que, como podría intuirse, la viga tiene una respuesta más lenta que el dispositivo de medición, empleando un tiempo mayor en alcanzar la temperatura de equilibrio.

Tabla 3. Dimensiones de la viga solidaria al dispositivo.

	Viga
Lv [mm]	4000
2Bv [mm]	25

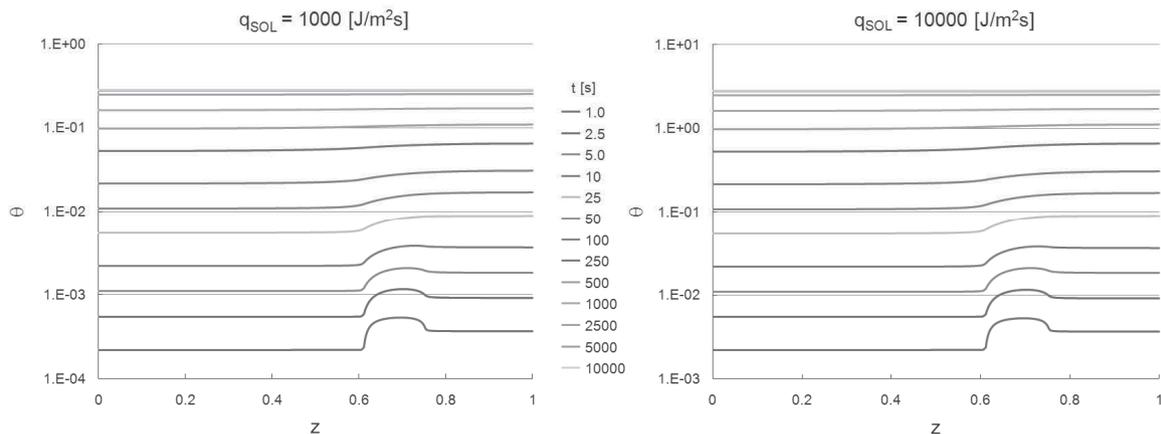


Fig. 4. Temperatura adimensional en función de la longitud adimensional para diferentes tiempos.

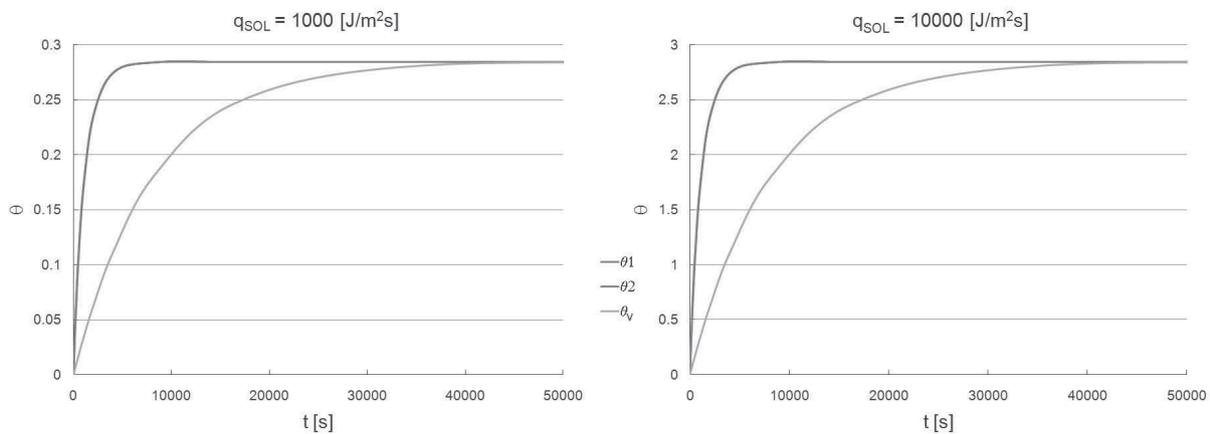


Fig. 5. Temperaturas adimensionales en función del tiempo en los extremos del elem.2 ( $\theta_1$  y  $\theta_2$ ) y temperatura adimensional de la viga  $\theta_v$ .

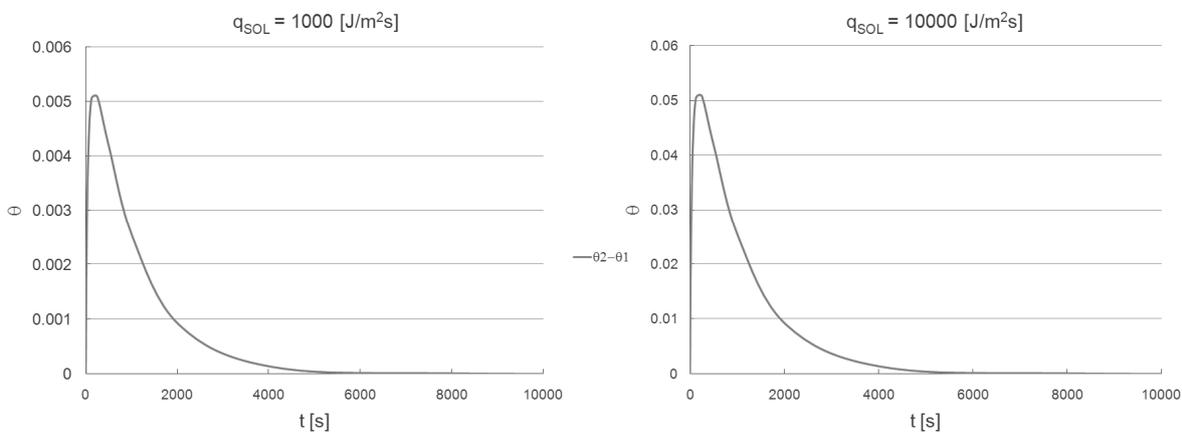


Fig. 6. Diferencia de temperatura adimensional entre los extremos del elem. 2.

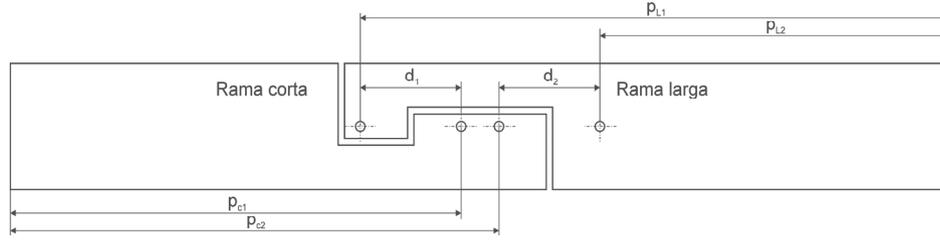


Fig. 7. Posición de los anclajes de las galgas.

#### 4. DILATACIÓN Y SEÑAL DEL DISPOSITIVO

La dilatación de las ramas del medidor producida por el aporte de calor externo, origina que las distancias relativas entre dos puntos cualesquiera de la misma se vean alteradas. La señal generada por el dispositivo ante este fenómeno depende de la geometría y de la interconexión de los elementos sensores (galgas extensiométricas), descritos en [4,5].

La ubicación de los anclajes de las galgas se muestra en la Fig. 7, [4,5].

La variación de longitud  $\Delta Z$  de un sólido de longitud inicial  $Z_0$  queda determinada por

$$\Delta Z = \lambda Z_0 \Delta \bar{T}, \quad (9)$$

donde  $\lambda$  es el coeficiente de dilatación lineal y  $\Delta \bar{T}$  es el aumento medio de temperatura, definido como

$$\Delta \bar{T} = \frac{\int_0^{Z_0} T dZ}{Z_0}, \quad (10)$$

Sustituyendo (10) en (9) y adimensionalizando, se obtiene:

$$\Delta z = \lambda T_a \int_0^{z_0} \theta dz, \quad (11)$$

Evaluando (11) para las longitudes  $z_0 = p_{c1}$ ,  $p_{c2}$ ,  $p_{L1}$  y  $p_{L2}$  se obtienen los corrimientos de los anclajes de las galgas.  $p_{c1}$ ,  $p_{c2}$ ,  $p_{L1}$  y  $p_{L2}$  son longitudes adimensionales, de modo que pueden integrarse en (11). Las deformaciones específicas medidas por las galgas son

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 = \varepsilon_4 &= \frac{\Delta z p_{c1} L_c + \Delta z p_{L1} L_L - \Delta z_V L_V}{d_1 L}, \text{ y} \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_3 &= \frac{-\Delta z p_{c2} L_c - \Delta z p_{L2} L_L + \Delta z_V L_V}{d_2 L}, \end{aligned} \quad (12)$$

donde  $d_1 L = d_2 L = D$  es la separación entre los anclajes de cada galga y  $\Delta z_V L_V$  es la dilatación de la viga actuando en los extremos del dispositivo.

Si la deformación  $\varepsilon_1$  se corresponde con la galga  $R_1$ , la deformación  $\varepsilon_2$  se corresponde con la galga  $R_2$ , y así sucesivamente, del puente de Wheatstone mostrado en la Fig. 8, entonces la señal de salida del puente estará dada por [8]

$$\frac{\delta E_0}{E_i} = \frac{FG}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4), \quad (13)$$

Si se reemplazan las Ecs. (12) en (13), se tiene

$$\frac{\delta E_0}{E_i} = \frac{FG}{4} \left( \frac{2\Delta z p_{c1} L_c + 2\Delta z p_{L1} L_L + 2\Delta z p_{c2} L_c + 2\Delta z p_{L2} L_L - 4\Delta z_V L_V}{D} \right), \quad (14)$$

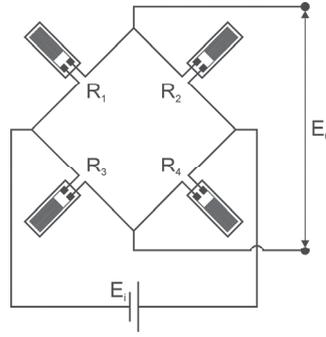


Fig. 8. Puente de Wheatstone completo.

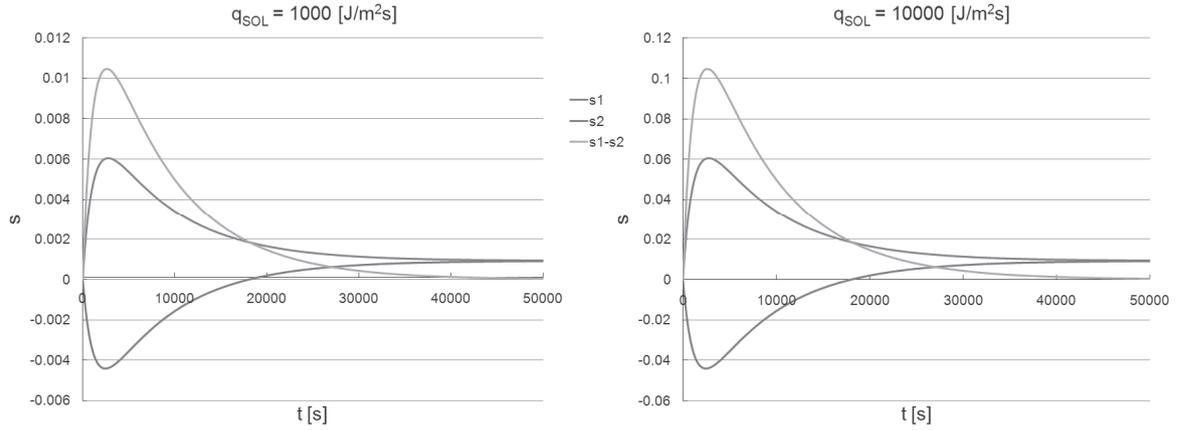


Fig. 9. Señal de salida del medidor en función del tiempo.

Observando la Fig. 7, se deduce que la dilatación de la viga actuante en los extremos del dispositivo, en estado estacionario, puede representarse por

$$\Delta z_V L_V = \Delta z p_{L1} L_L + \Delta z p_{c1} L_c - \Delta z D, \quad (15)$$

Reemplazando (15) en (14), se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\delta E_0}{E_i} &= \frac{FG}{2} \left( \frac{\Delta z p_{c2} L_c + \Delta z p_{L2} L_L - \Delta z p_{L1} L_L - \Delta z p_{c1} L_c + 2\Delta z D}{D} \right) \\ &= \frac{FG}{2} \left( \frac{\Delta z p_{c2} L_c - \Delta z p_{c1} L_c + 2\Delta z D}{D} - \frac{\Delta z p_{L1} L_L - \Delta z p_{L2} L_L}{D} \right) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

La Ec. (16) implica que, en estado estacionario, el efecto de la dilatación del dispositivo junto al de la viga producen una señal 100% compensada.

En la Fig. 9 se muestra la señal de salida del dispositivo,  $s = \frac{2}{FG} \frac{\delta E_0}{E_i}$ , para dos valores distintos de calor aportado, donde se define:

$$\begin{aligned} s_1 &= \frac{1}{2} (\varepsilon_1 + \varepsilon_4), \text{ y} \\ s_2 &= \frac{1}{2} (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) \end{aligned}, \quad (17)$$

Puede apreciarse en la Fig. 9 que a medida que aumenta el flujo de calor, el transitorio en la señal se torna más abrupto.

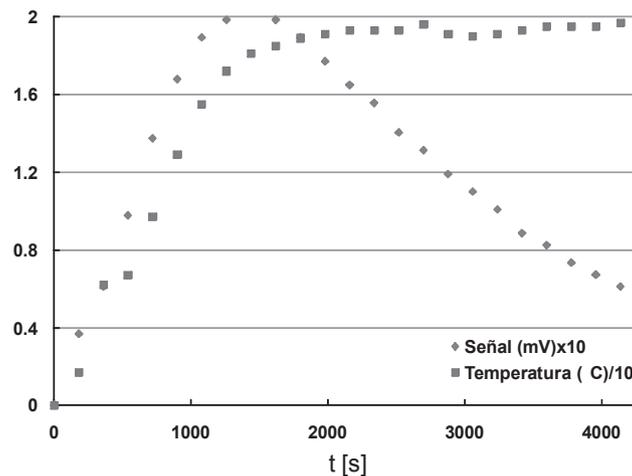


Fig. 10. Mediciones de laboratorio.

## 5. ENSAYOS DE LABORATORIO

Con la finalidad de constatar el modelo físico-matemático planteado, se efectuaron mediciones sobre una porción de viga de  $L_v = 800$  mm con un dispositivo como el mostrado en la Fig. 1 sujeto a la misma, en un ambiente controlado. Se registraron simultáneamente las lecturas del dispositivo y de un termopar situado próximo al mismo. Básicamente, se realizaron dos tipos de ensayo: temperatura constante y salto escalón de aporte de calor. Los primeros mostraron inexistencia de deriva de la señal en el tiempo. Para los segundos se empleó como fuente calorífica una pantalla de cuarzo de 800 W ubicada a 60 cm del dispositivo. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 10.

Puede apreciarse en la Fig. 10 que la respuesta de la celda es cualitativamente similar a la simulación ilustrada en las Figs. 9.

## 6. ENSAYOS EXPERIMENTALES DE CAMPO

Un dispositivo como el presentado ha sido sometido a ensayos experimentales de campo. Para ello se montó el mismo sobre la viga principal de un Aparato Individual de Bombeo Mecánico de Petróleo (AIBM), como se muestra en la Fig. 11. Se registraron las señales de carga (deformación) y temperatura medida en el sistema de adquisición.

### 6.1. Señal de temperatura registrada

Junto con la señal de deformación que se obtiene del medidor, se registra la temperatura registrada dentro del receptáculo que contiene toda la electrónica del sistema de adquisición y transmisión de datos, situada en cercanías del mismo (contenedor rojo de la Fig. 11).

Para poder evaluar cuán representativa es la temperatura medida respecto de la respuesta del dispositivo, se desarrolla el análisis térmico del receptáculo en el que se aloja el sensor de temperatura. Este consta de una caja cerrada de aluminio y contiene, además de los sistemas electrónicos y la batería que los alimenta (que son fuentes térmicas), aire estancado el cual es el medio por el que se transmite el calor en su interior. La obtención del campo de temperatura dentro de la caja para diferentes aportes de calor externos, si bien es un problema ampliamente estudiado, es compleja y requiere la resolución de las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento y energía de manera acoplada dado que la convección natural y la radiación en el interior juegan un papel fundamental [9-12].

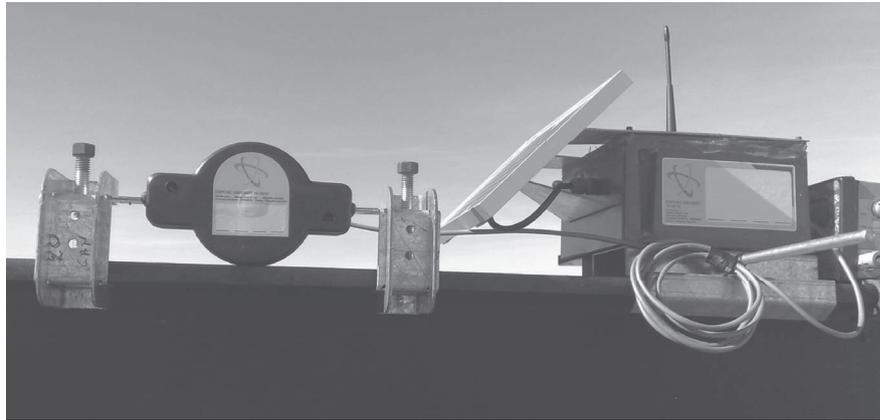


Fig. 11. Montaje del dispositivo medidor de deformación analizado.

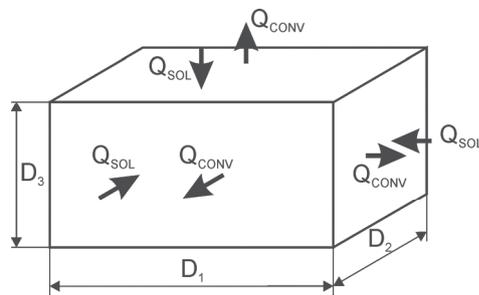


Fig. 12. Geometría del receptáculo que contiene al sensor de temperatura.

La aproximación simplificada presentada en este trabajo sólo contempla la temperatura del receptáculo considerando que al aportarle calor por tres de sus caras, todo el volumen tiene una misma temperatura que varía en el tiempo. Además, se considera que la transferencia por convección con el medio circundante se produce en las seis caras. Este análisis claramente ofrece tiempos de respuesta más rápidos que los que se obtendrían al analizar la interacción pared-aire así como la radiación en el interior, pero ofrece un parámetro mínimo del tiempo de respuesta. La Fig. 12 muestra un esquema del modelo simplificado empleado para simular la respuesta de la temperatura en el sistema de adquisición, frente a diferentes aportes de calor externos.

Si se aplica el balance de energía sobre el receptáculo, y se considera que existe flujo de calor por convección ( $Q_{CONV}$ ) en todas las superficies, y aporte de calor sobre tres de ellas ( $Q_{SOL}$ ) proveniente de una fuente externa, se obtiene:

$$\rho_c C_{v_c} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{2e_c} [q_{SOL} - h(T - T_a)], \quad (18)$$

donde  $e_c$  es el espesor de las paredes. Si se adimensionalizan las variables, se llega a:

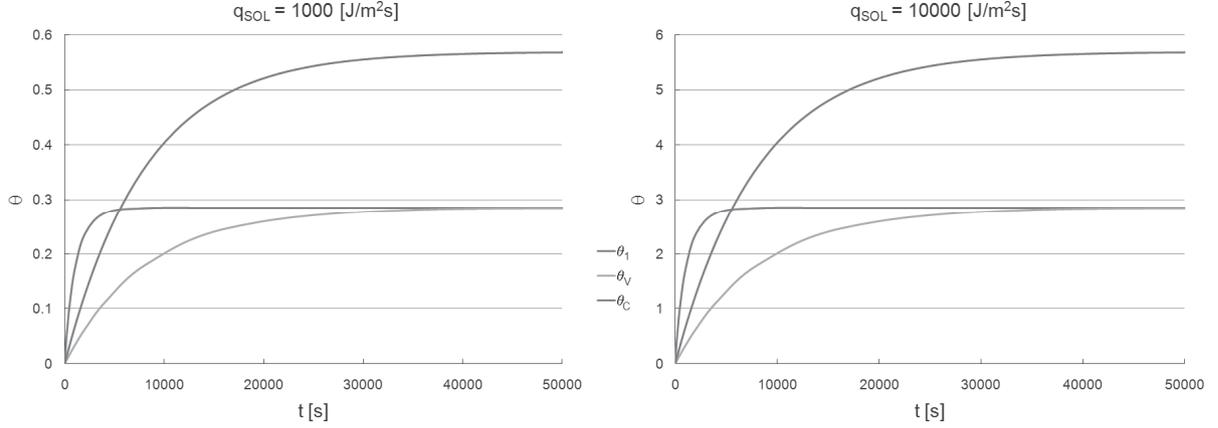
$$\frac{d\theta_c}{dt} = \xi(C_c - h\theta_c), \quad (19)$$

donde  $\theta_c = \frac{T - T_a}{T_a}$ ,  $\xi = \frac{1}{2\rho_c C_{v_c} e_c}$ , y  $C_c = \frac{q_{SOL}}{T_a}$ .

La integración de (19) aplicando la condición inicial  $\theta_c(0) = 0$ , resulta

Tabla 4. Propiedades físicas del material del receptáculo y espesor de pared.

$C_{vc}$ [J/(KgK)]	900
$\rho_c$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	2700
$e_c$ [mm]	10

Fig. 13. Temperaturas adimensionales en función del tiempo en un extremo del elem.2 ( $\theta_1$ ), temperatura adimensional de la viga  $\theta_v$  y temperatura adimensional en el receptáculo  $\theta_c$ .

$$\theta_c = \frac{C_c}{h} (1 - e^{-\xi ht}), \quad (20)$$

Puede verse en (20) que la amplitud de la temperatura ante un aporte de calor externo depende de la magnitud del calor aportado (a través de  $C_c$ ), mientras que la velocidad de respuesta depende de las propiedades del material del receptáculo y de su espesor (a través de  $\xi$ ).

Las propiedades físicas del material del receptáculo (aluminio) y el espesor de sus paredes, se describen en la Tabla 4.

En la Fig. 13 se muestra la evolución de la temperatura adimensional en el receptáculo  $\theta_c$ , comparada con la respuesta del dispositivo y de la viga, para  $q_{SOL}$  de 1000 y 10000 J/m<sup>2</sup>s.

Puede verse en la Fig. 13 que el tiempo de respuesta de la temperatura dentro de la caja es comparable al de la viga, pero el valor alcanzado por el modelo es distinto dado que el material de la misma es diferente al de la viga y al del dispositivo.

## 6.2. Mediciones experimentales y análisis de datos

En la Fig. 14 se muestran las señales registradas en un período de cuatro días, expresadas de manera escalada.  $F_m$  representa la carga media adimensional registrada mientras que  $\theta_c$  representa la temperatura del receptáculo, donde

$$F_m = \frac{\bar{F}}{F_{MAX}}, \quad y \quad (21)$$

$$\theta_c = \frac{\theta_c}{\theta_{cMAX}}$$

Pueden verse en la Fig. 14 dos períodos diferenciados por cada día de medición: uno en el cual la temperatura registrada crece y la señal del medidor disminuye, y otra en la que la temperatura decrece y la señal de éste se estabiliza. Estos períodos se corresponden con horas del día y de la noche, respectivamente. En el período nocturno, la señal del medidor se mantiene independientemente del valor que alcance la temperatura del recinto. Esta característica concuerda con lo esperado, según los resultados de las simulaciones mostradas en las Figs. 5 y 9, y los ensayos de laboratorio mostrados en la Fig. 10. En la noche el

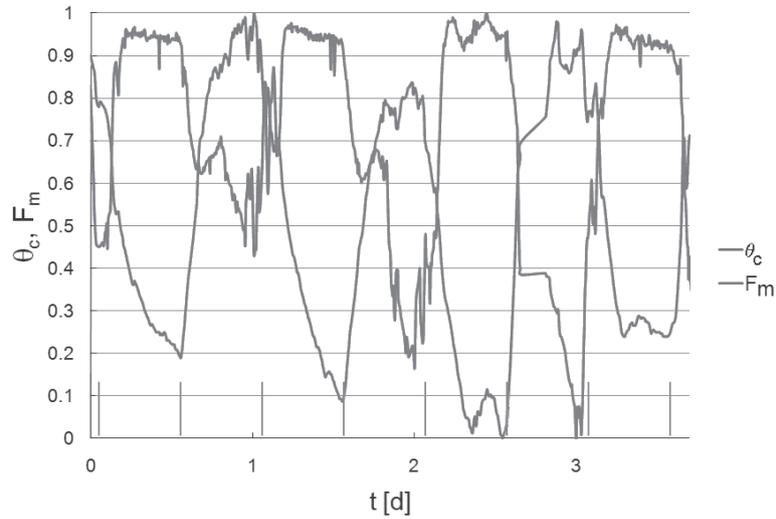


Fig. 14. Datos experimentales de fuerza media y temperatura, en función del tiempo.

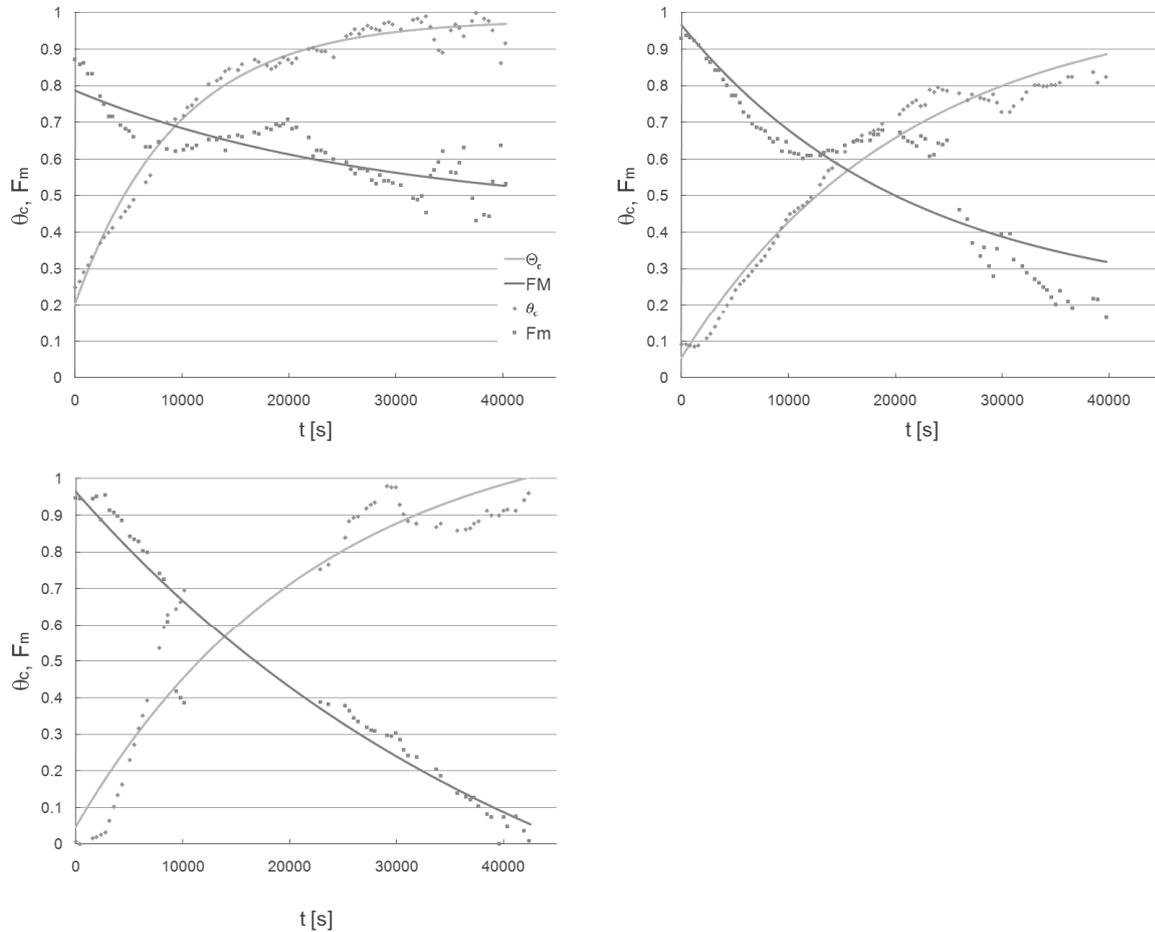


Fig. 15. Datos "diurnos" extraídos de la Fig. 14 y ajuste exponencial para cada señal.

aporte de calor exterior  $q_{SOL}$  es nulo por lo que, a pesar de existir cambios en la temperatura de referencia (ambiente)  $T_a$ , la señal del medidor tiene tiempo suficiente para compensarse.

Durante el día, la señal es más compleja ya que se conjugan al menos dos fenómenos: el aporte de calor  $q_{SOL}$  no es constante; y la temperatura de referencia (ambiente)  $T_a$  cambia permanentemente. Esto produce

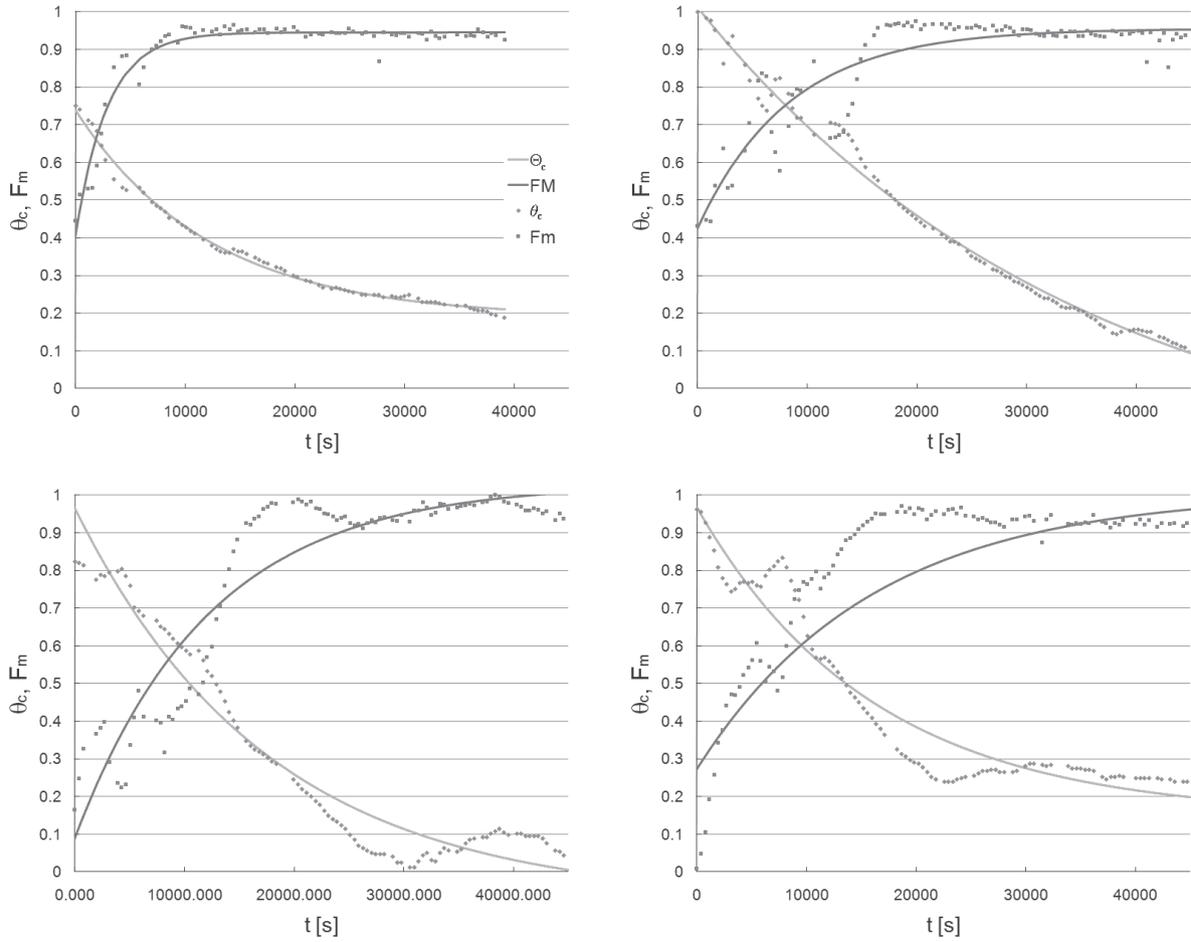


Fig. 16. Datos “nocturnos” extraídos de la Fig. 14 y ajuste exponencial para cada señal.

que las señales (tanto de la temperatura como la del medidor) no logren estabilizarse ya que no llegan a alcanzar el régimen estacionario.

Si se dividen los datos de la Fig. 14 según éstos se correspondan con datos “diurnos” o “nocturnos”, puede evaluarse la respuesta del sistema para tres días ( $d_1$ ,  $d_2$ , y  $d_3$ ) y cuatro noches ( $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  y  $n_4$ ).

En las Figs. 15 se aprecia la respuesta de la señal del medidor y la temperatura del recinto para tres períodos diurnos distintos. En las Figs. 16 se aprecia la respuesta para los cuatro períodos nocturnos correspondientes. El ajuste de los datos experimentales, para las dos señales, se corresponde con un ajuste exponencial de la forma

$$\begin{aligned} F_M &= A_F e^{(-B_F t)} + C_F, \text{ y} \\ \Theta_c &= A_T e^{(-B_T t)} + C_T \end{aligned} \quad (22)$$

Puede verse que las señales son representadas correctamente por un ajuste exponencial, lo que coincide con los lineamientos de los modelos presentados.

En todos los casos, el tiempo se expresa en segundos y se ha re-escalado de modo que todos los gráficos comienzan en  $t=0$ . La escala vertical es la misma que la de la Fig. 14. El objetivo del cambio de escala temporal es el de ofrecer una mejor apreciación en la comparación cualitativa de estas figuras con la Fig. 17. En esta última se aprecia la señal del dispositivo y la temperatura del receptáculo simuladas con los modelos presentados, para  $q_{SOL}=1000 \text{ J/m}^2\text{s}$  (escalados entre cero y la unidad) en el caso diurno ( $d_i$ ), y  $q_{SOL}=0 \text{ J/m}^2\text{s}$  para el caso nocturno ( $n_i$ ). En este último caso, la temperatura inicial del sistema es la temperatura de estado estacionario del modelo diurno. Nótese que la información brindada por el primer caso es similar a la del experimento de la Fig. 10, bajo otras condiciones de aporte de calor y mostrando la

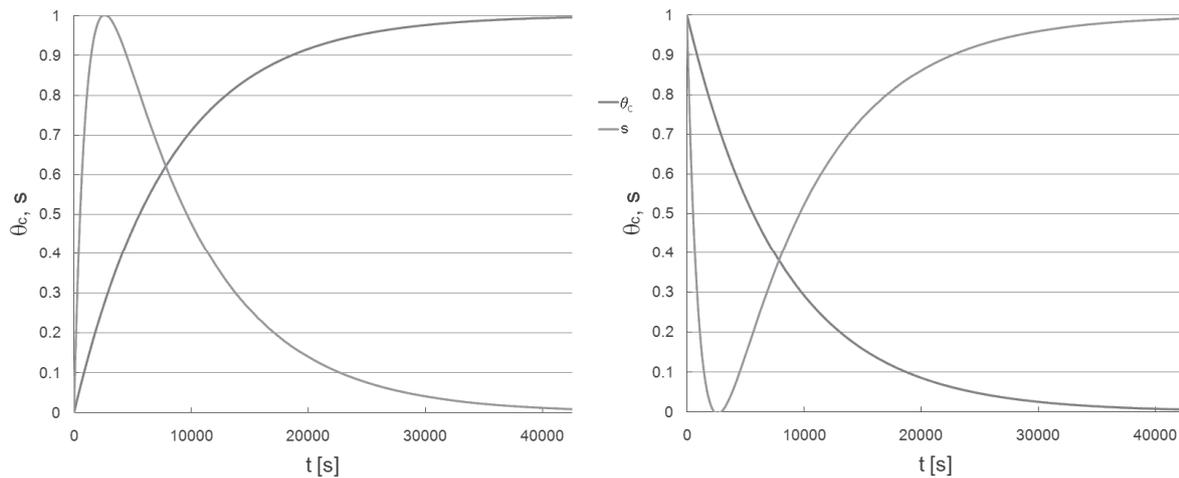


Fig. 17. Simulaciones de la respuesta del medidor de deformación y de la temperatura medida: izq. “diurno”, der. “nocturno”.

temperatura en el interior del contenedor del sistema electrónico en lugar de aquella en cercanías del dispositivo como en los ensayos de laboratorio.

De la comparación de las Figs. 15 a 17 se aprecia que, si bien en las señales simuladas existe un transitorio rápido (debido a la respuesta de las ramas del dispositivo de medición) seguido de otro más lento (debido a la viga), la respuesta a tiempos “largos” es cualitativamente similar a las mediciones de campo. Cabe destacar una vez más que todas las simulaciones se han efectuado a la misma temperatura ambiente  $T_a$ , y con aportes de calor  $q_{SOL}$  tipo escalón. Estas condiciones no son exactamente iguales a las presentes en los ensayos experimentales ya que, en la realidad, tanto la temperatura ambiente como el aporte de calor proveniente del Sol cambian en el transcurrir de las horas. Además, debe sumarse el hecho de que el coeficiente convectivo  $h$  también es una función de las condiciones climáticas reinantes (viento, humedad, etc). No obstante el modelo presentado captura razonablemente el comportamiento físico del sistema en condiciones de campo, y exhibe una respuesta notablemente similar en lo cualitativo a la de los ensayos de laboratorio mostrados en la Fig. 10.

## 7. MODELOS BASADOS EN REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Dentro de las ciencias de la computación, el aprendizaje automático o *machine learning* [13] es una disciplina que se basa en la capacidad de modelado de sistemas a partir de la observación de un número de casos del mismo. Los datos usados para generar el modelo se los denomina de entrenamiento. Una vez que el modelo fue generado (o entrenado) con los datos del entrenamiento, el mismo está listo para ser usado con nuevos datos, a los que se le da el nombre de datos de testeo. La capacidad predictiva o de generalización del modelo estará sujeta al error obtenido sobre este conjunto de testeo.

Las redes neuronales artificiales, o simplemente redes neuronales [14] son una familia de técnicas de modelado no lineal cuyas numerosas contribuciones en problemas científicos e industriales, las convierten en uno de los métodos de aprendizaje automático más usados [15]. La configuración y funcionamiento de estos modelos matemáticos guardan una analogía con el funcionamiento de las neuronas en el cerebro humano.

Cada neurona o nodo es representado por una función de activación que ante la presentación de una entrada emite una salida. A su vez, cada neurona se encuentra conectada con otras, mediante enlaces unidireccionales. Cada uno de estos enlaces tiene una incidencia sobre el nodo al que conecta determinado por un valor real denominado peso. La configuración de estos nodos o neuronas en múltiples capas permite el modelado de cualquier función no lineal. La Fig. 18 muestra una representación gráfica de una red neuro-

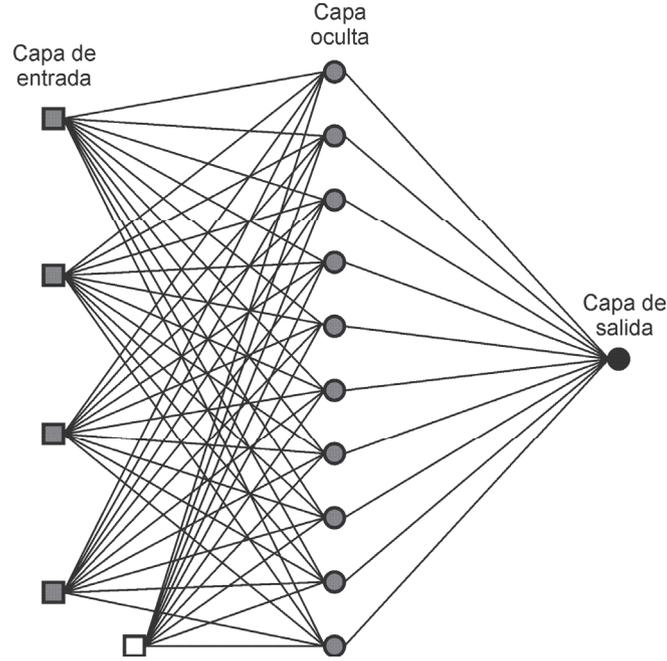


Fig. 18. Red neuronal de dos capas.

nal de dos capas. Cada cuadrado corresponde a una de las variables de entrada del problema y los círculos se corresponden con los nodos o neuronas.

El funcionamiento básico de una red neuronal de dos capas puede describirse a partir de (23), donde  $f$  es la función a modelar con la red a partir del vector de entrada  $x$  y una serie de matrices  $W^{(k)}$  (con  $k = 2$  si la red tiene dos capas). Las funciones  $g_j$  y  $G$  son las funciones de activación de las neuronas correspondientes a nodos de la capa oculta y de salida respectivamente. Las matrices  $W^{(1)}$  y  $W^{(2)}$  corresponden a las matrices de pesos que vinculan los nodos de cada capa.

$$f(x, W) = G\left(\sum_j W_{1,j}^{(2)} g_j\left(\sum_{i=1}^n W_{j,i}^{(1)} x_i + w_{j,0}^{(1)}\right) + W_{1,0}^{(2)}\right), \quad (23)$$

La potencialidad de las redes neuronales no está en la capacidad de modelado en sí, sino que la principal ventaja es la capacidad de “aprender” el modelo en forma automática. El primer algoritmo de aprendizaje para las redes neuronales es el de retro-propagación (*back-propagation*) [16]. Básicamente, el aprendizaje consiste en la optimización de los pesos que vinculan a las neuronas, a partir de la presentación de casos de entrada-salida del sistema real.

### 7.1. Modelo de deformación térmica realizado con redes neuronales

Se ha mencionado que las redes neuronales son capaces de inferir una función  $y = f(\bar{x})$  a partir de un conjunto de entrenamiento  $R = ((\bar{x}_1, y_1), \dots, (\bar{x}_m, y_m))$ , donde cada par  $(\bar{x}_i, y_i)$  es una observación de entrada-salida. De los 620 datos de campo observados disponibles, se tomó el 80% para construir el modelo (496 casos de entrenamiento), mientras que los 124 casos restantes se usaron para testear la capacidad de modelado de la red en forma independiente. Este procedimiento de separación, entrenamiento y validación fue repetido 50 veces para asegurar la confiabilidad estadística de los resultados obtenidos, y eliminar el sesgo que pudiera ocasionar la separación aleatoria de los datos.

La arquitectura de la red utilizada corresponde a una de dos capas, con 5 nodos en la capa oculta. La misma es entrenada haciendo uso de una regularización bayesiana [17], lo que permite no sobreentrenar la optimización de los pesos [18].

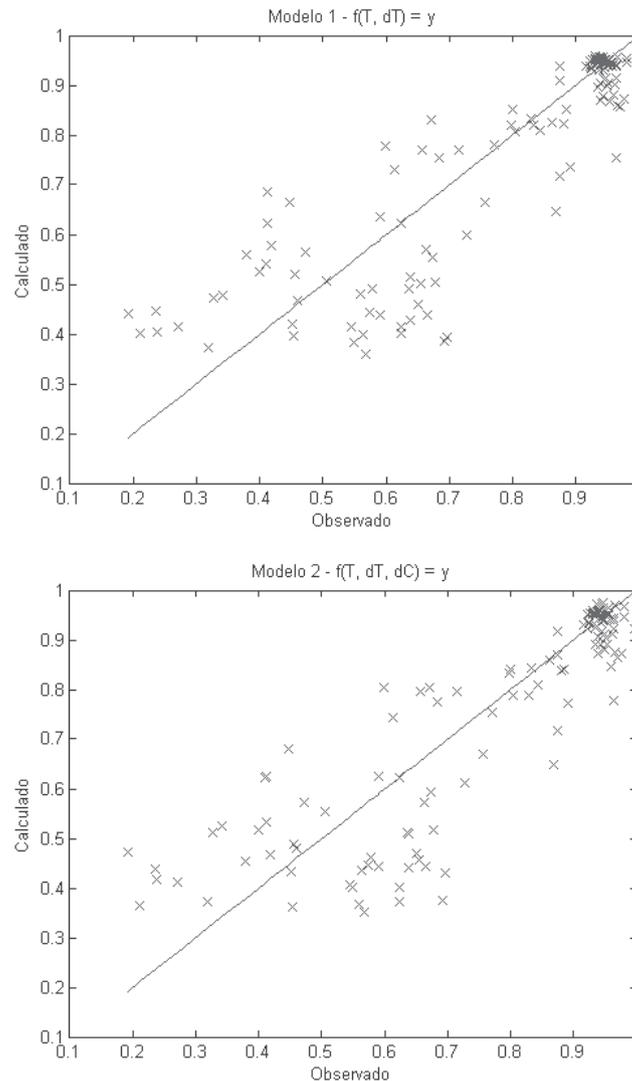


Fig. 19. Predicciones obtenidas sobre el conjunto de testeo para ambos modelos.

Se aplicaron dos modelos diferenciados dependiendo de cuáles fueron las variables consideradas en la entrada  $\bar{x}$ . En el primero de ellos se contemplaron solamente la temperatura y una aproximación de la derivada de la temperatura en el tiempo. En el segundo modelo, a las dos variables anteriores se le añadió la derivada de la señal de deformación con respecto al tiempo. En ambos casos, la variable de salida  $y$ , variable que se desea modelar, es la lectura de la deformación según el dispositivo medidor de deformación.

## 7.2. Resultados

La Fig. 19 muestra los resultados de predicción obtenidos con la red neuronal sobre el conjunto de testeo. En el eje de las abscisas se tiene el valor  $y$  observado, mientras que en el eje de las ordenadas, se tiene la predicción obtenida con la red. La distancia vertical a la función identidad indica el error absoluto obtenido en cada predicción.

El cálculo de las métricas habituales para evaluar la calidad de la predicción, indican que el primer modelo posee un error relativo (basado en las 50 réplicas) de 7,92%, mientras que para el segundo es de 7,68%. El coeficiente de determinación, el cual mide la proporción de la dispersión capturada por el modelo de regresión, es de 0,756 para el primer modelo y de 0,773 para el segundo.

## 8. CONCLUSIONES

El medidor de deformación en estudio presenta susceptibilidad ante cambios en el flujo de calor que recibe de una fuente externa, como puede ser la radiación solar. La señal de salida depende de las respuestas transitorias, tanto del medidor mismo como de la viga a la que se encuentra solidario. El estudio presentado del fenómeno físico responsable de la deriva muestra muy buena concordancia con los ensayos de laboratorio y brinda resultados aceptables respecto de los de campo.

Dado que la viga tiene una masa varios órdenes de magnitud mayor a la del dispositivo, la compensación en la señal de salida se logra luego de transcurrido un amplio intervalo de tiempo desde la perturbación, alcanzándose cuando la viga llega al equilibrio térmico.

Del análisis de los resultados puede inferirse que para reducir esta deriva debería limitarse el flujo de calor que incide en el sistema o bien lograr una alta tasa de transferencia de calor entre el dispositivo y la viga para reducir la diferencia de temperatura entre ellos.

El empleo de la señal de temperatura registrada en el receptáculo como posible señal de alimentación para un sistema de corrección de la salida del dispositivo debe ser tratado debidamente ya que esta señal presenta un tiempo de respuesta propio, diferente al del resto del sistema.

Con respecto a los resultados obtenidos a partir con la red neuronal, puede afirmarse que la misma provee una capacidad aceptable para modelar la deformación medida por el dispositivo, y por ende, corregir la deformación provocada por la temperatura. El error relativo obtenido en la predicción con los dos modelos de red neuronal es menor al 10%, lo que representa un error aceptable para la aplicación en estudio. De ambos modelos se destaca al segundo de ellos como más promisorio, dado que éste permite un error aún menor en las predicciones obtenidas. Puede apreciarse también de la Fig. 19 que la mayor cantidad de observaciones se realizaron con una lectura adimensional de la carga (deformación) cercana a los 0,95. Por tal motivo, la red neuronal predice con mayor precisión esos valores.

Finalmente, es necesario advertir que una recolección de datos más amplia, homogéneamente tomada en el tiempo y con distintas mediciones de carga aplicada, mejoraría la calidad y la robustez del modelo de red presentado.

## REFERENCIAS

- [1] Figliola, R.S., Beasley, D.E., *Mediciones Mecánicas, Teoría y Diseño*, Alfaomega (2003)
- [2] Feodosiev, V.I., *Resistencia de Materiales*, Mir (1972)
- [3] Collet, C.V., Hope, A.D., *Mediciones en Ingeniería*, Gustavo Gili, S.A. (1976)
- [4] Vignolo, G.G., Vázquez, J.A., Medidor de Deformación en Elementos Estructurales, Patente Arg. En trámite N°Tr.:20127 - Ex.:20090103772 (TECSS SRL:85%, UNPSJB:15%) (2009)
- [5] Vignolo, G.G., Vázquez, J.A., “Desarrollo de un Medidor de Deformación Paralelo No Intrusivo Para la Determinación de Cargas en Vigas”, *I CAIM* (2008)
- [6] Bird, R.B., Stewart, W.T., Lightfoot, E.N., *Fenómenos de Transporte*, Reverté (1992)
- [7] Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., *Conduction of Heat in Solids*, Oxford (1959)
- [8] Khan, A.S., Wang, X., *Strain Measurements and Stress Analysis*, Prentice Hall (2001)
- [9] Bejan, A., Kraus, A., *Heat Transfer Handbook*, John Wiley & Sons (2003)
- [10] Chung, K.H., Hyun, J.M., “Transient Natural Convection in a Cavity With Walls of Finite Thickness”, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, **32**(7), 749–767 (1997)
- [11] Rebollo, D., “Análisis de la Transferencia de Calor Por Convección Natural y Radiación Combinadas en Cavidades Bidimensionales”, *Mecánica Computacional*, **XXVII**, 1649-1671 (2008)
- [12] Gebhart, B., “Transient Response and Disturbance Growth in Vertical Buoyancy-Driven Flows”, *Journal of Heat Transfer*, **110**, 1166-1174 (1988)
- [13] Witten, I.H., Frank, E., *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques 2° ed.* Gray J, editor. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann (2005)
- [14] Bishop, C.M., *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford University Press (1995)

- [15] Kang, Y., Chang, Ch.W., Huang, Y., Hsu, Ch., Nieh, I., “Modification of a neural network utilizing hybrid filters for the compensation of thermal deformation in machine tools”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **47**, 376–387 (2007)
- [16] Bryson, A., Ho, Y.C., *Applied Optimal Control*, Blaisdell, New York (1969)
- [17] MacKay, D., “Bayesian interpolation”, *Neural Computation*, **4**, 415-447 (1992)
- [18] Hawkins, D.M., “The Problem of Overfitting”, *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, **44**, 1-12 (2004)

## **ANALYTICAL, NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE THERMAL INFLUENCE IN STRAIN MEASUREMENTS ON STRUCTURAL ELEMENTS**

**Abstract** – Strain measuring on structural elements requires to take necessary precautions during the design and assembly of the strain gage element, as well as during the measurement interpretation process. In general, the elements that make up a structure are designed so that they are able to withstand the applied load, and so that the consequent distortion does not affect its normal function. The distortion raises an important issue related to the strain measurement, as due to design principles it should be minor. Thereby, the distortions to be evaluated are in the same order of magnitude as those due to external factors, such as thermal expansion. In this work, we study how thermal expansion affects the strain gauging on a beam when a specific device is used. We show different alternatives to compensate the measured deformation, so that the final measurement reflects the intended information. The system we consider has a large beam where a parallel strain gage device is applied and a thermometer is used to measure ambient temperature. The masses of each element of the system yield different thermal variation rates, and hence their thermal expansion variation rates are also different. In order to compensate this fact, we present the analysis of the physical phenomenon that relates the heat contributed to the system and the masses of the elements. The results are compared to empirical measurements. Finally, the analysis of the experimental measurements is studied, and we propose a computational model based on artificial neural networks to estimate the thermal expansion.

**Keywords** – Strain gage, Strain, Thermal expansion, Neural networks.