

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Método sencillo para incluir la temperatura en la curva de calibración de un transductor de presión.
<i>Autor / Adscripción</i>	Serge Tamari Alejandro López Vázquez Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Marco Antonio Cabrera Ingeniería y Metrología, S.A. de C. V., México
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 20(1): 19-27
<i>Fecha de publicación</i>	2003
<i>Resumen</i>	Los transductores de presión manométricos y compatibles con el agua tienen numerosas aplicaciones en hidráulica, agronomía e hidrología. Desafortunadamente, se sabe desde hace tiempo que su respuesta puede ser afectada de manera importante por cambios de temperatura, incluso cuando el transductor cuenta con un circuito electrónico, cuya función sea reducir la sensibilidad del sensor a ésta. En este trabajo se propone un método sencillo para incluir la temperatura en la curva de calibración de un transductor de presión. Se demuestra que es factible mejorar la exactitud de un transductor de presión, tomando en cuenta empíricamente su sensibilidad a la temperatura
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1245

Método sencillo para incluir la temperatura en la curva de calibración de un transductor de presión

Serge Tamari
Alejandro López-Vázquez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Marco Antonio Cabrera

Ingeniería y Metrología, S.A. de C.V., México

Los transductores de presión manométricos y compatibles con el agua tienen numerosas aplicaciones en hidráulica, agronomía e hidrología. Desafortunadamente, se sabe desde hace tiempo que su respuesta puede ser afectada de manera importante por cambios de temperatura, incluso cuando el transductor cuenta con un circuito electrónico, cuya función sea reducir la sensibilidad del sensor a ésta. En este trabajo se propone un método sencillo para incluir la temperatura en la curva de calibración de un transductor de presión. Dicho método no requiere un sistema para controlar la temperatura, sino un sensor de temperatura y un sistema de adquisición de datos: se deja el transductor en el lugar donde se pretende utilizar y durante algunos días se monitorea su respuesta junto con la temperatura ambiente. Como ejemplo de aplicación se presentan los resultados obtenidos en el laboratorio con tres transductores de presión. El método propuesto permitió reducir en más de un 50% el error de medición con los transductores probados. También se observó que la sensibilidad a la temperatura de los transductores no era la misma, a pesar de que eran del mismo modelo. El presente trabajo demuestra que es factible mejorar la exactitud de un transductor de presión, tomando en cuenta empíricamente su sensibilidad a la temperatura.

Palabras clave: *sensor de presión, calibración, efecto térmico, adquisición de datos, carga hidráulica, piezometría, tensiometría.*

Introducción

Un transductor de presión manométrico sirve para medir la presión manométrica (H); es decir, la diferencia de presión entre el fluido estudiado (por ejemplo, agua o aire) y la atmósfera. Este tipo de sensor tiene numerosas aplicaciones en hidráulica, agronomía e hidrología. Al respecto, se puede mencionar el estudio de fenómenos transitorios en modelos hidráulicos (Martínez, 1988); el control de la distribución del agua en una red de canales (Prado-Hernández et al., 2003); la determinación del gasto o detección de fugas en tuberías (Carrera y Verde, 2001; Fuentes y Rosales, 2004); la automatización del

riego (Lowery et al., 1986); el monitoreo de la succión del agua o de la presión del aire en suelos no saturados (Watson y Jackson, 1967; Tamari et al., 1993; Renault et al., 1998; Bruckler et al., 2002); la determinación del nivel piezométrico en pozos, así como la construcción de sistemas para suministrar el agua con una carga o un gasto constante (Constanz y Murphy, 1987; Messing y Jarvis, 1993; Pallás, 2001).

Desafortunadamente, la respuesta de un transductor de presión no depende solamente de la presión manométrica, sino también de otros factores, tales como (Pallás, 2001): la alimentación eléctrica del transductor, el sentido de variación de la presión (fenómeno de

histéresis), la temperatura ambiente y las vibraciones a las cuales está sometido el instrumento. Es sabido desde hace tiempo que la respuesta de un transductor de presión puede ser afectada de una manera importante por los cambios de temperatura (Lowery et al., 1986; Messing y Jarvis, 1993), incluso cuando el transductor cuenta con un circuito electrónico integrado cuya función sea precisamente reducir la sensibilidad del sensor a ésta (Renault et al., 1998). Por lo tanto, cuando no es posible trabajar a temperatura constante, es importante considerar el efecto de la temperatura sobre la respuesta de un transductor de presión y, en caso de que sea necesario, tratar de corregirlo. Esto implica tener un sensor de temperatura y un procedimiento de calibración tal, que se puede determinar una relación de la forma $H(U, T)$, donde H es la presión manométrica (m de columna de agua); U, la señal del transductor de presión (V), y T la temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$).

Se han encontrado pocos trabajos en la literatura sobre cómo tomar en cuenta el efecto de la temperatura en la curva de calibración de un transductor de presión (Lowery et al., 1986; Messing y Jarvis, 1993; Renault et al., 1998; Bruckler et al., 2002); éstos proponen hacerlo de manera estática, esto es, determinando una familia de relaciones $H(U)$ para valores discretos de T. Sin embargo, esta forma de proceder requiere de un sistema para poder controlar la temperatura del transductor de presión. Además, tal como lo han sugerido Watson y Jackson (1967) en su estudio sobre la respuesta de un sistema compuesto por un transductor de presión y un mini-tensiómetro, existe la posibilidad de que la respuesta de un transductor de presión y sus accesorios (tubos y sistema de adquisición de datos) no sea la misma si la temperatura varía muy lentamente o si presenta oscilaciones a escala de un día.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo ha sido desarrollar un método dinámico para incluir el efecto de la temperatura en la curva de calibración de un transductor de presión, y probar este método en un laboratorio sin control de temperatura. Con el método propuesto no se requiere un sistema para controlar la temperatura; el transductor simplemente se deja en el lugar donde se pretende utilizar después y se monitorea su respuesta durante algunos días, al mismo tiempo que la temperatura ambiente.

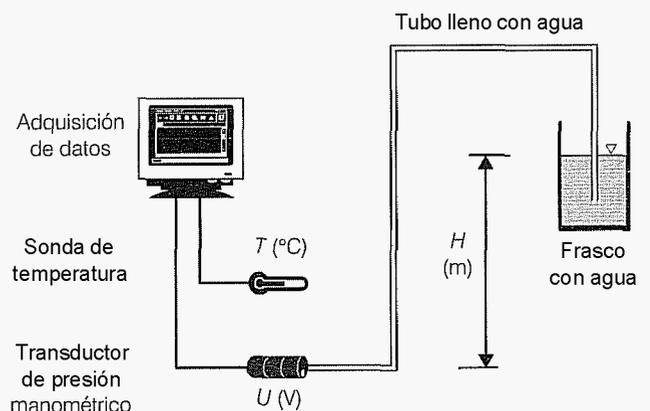
Método de calibración propuesto

Cuando no se cuenta con un sistema para controlar la temperatura, se podría evaluar el efecto de la temperatura sobre la respuesta de un transductor de presión, calibrándolo sucesivamente a diferentes horas

del día. Procediendo de esta manera, se obtendría una serie de curvas $H(U)$ para un rango de valores de T. Sin embargo, este procedimiento es difícil de automatizar. Por este motivo, parece más conveniente proponer otro:

1. Se instala el transductor de presión en el lugar donde se pretende utilizar, junto con una sonda de temperatura y un sistema de adquisición de datos. El transductor se conecta por medio de un tubo a un frasco lleno con agua. La presión aplicada al transductor (H) está dada por la diferencia de alturas entre el nivel del agua en el frasco y la posición del transductor (ilustración 1).
2. Se somete el transductor a una cierta presión (H_0), y se monitorea la señal de salida del transductor (U) durante por lo menos un día. Al mismo tiempo se monitorea la temperatura ambiente con la sonda de temperatura (T). De esta manera se obtiene una primera relación $U_0(T)$.
3. Posteriormente se somete el transductor a otra presión (H_1), y se monitorea su señal de salida (U) y la temperatura durante por lo menos un día. De esta manera se obtiene una segunda relación $U_1(T)$.
4. Después se agrupan los resultados de las dos pruebas de monitoreo, de tal forma que para diversos valores registrados de T, se tiene por lo menos un par de valores $\{(U_0, H_0); (U_1, H_1)\}$. Considerando que la respuesta del transductor varía linealmente con la presión (lo cual se puede verificar fácilmente con el dispositivo experimental descrito), se utilizan estos pares de valores para calcular los coeficientes de la relación $H = \alpha \cdot U + \beta$ para cualquier

Ilustración 1. Dispositivo experimental considerado para poder incluir la temperatura (T) en la curva de calibración de un transductor de presión compatible con el agua (relación $H(U)$).



valor de T . A continuación, los coeficientes α y β (que son funciones de T) se denominarán sensibilidad y offset del transductor de presión, respectivamente.

- Finalmente, se ajustan las relaciones experimentales $\alpha(T)$ y $\beta(T)$ por medio de dos funciones analíticas. Se obtendrá entonces una relación de la forma $H = \alpha(T) U + \beta(T)$, que toma en cuenta explícitamente la temperatura ambiente en la curva de calibración del transductor de presión.

Es conveniente hacer dos comentarios sobre las condiciones de uso del método de calibración propuesto. Por un lado, el método es, *a priori*, solamente válido para condiciones experimentales tales, que el transductor de presión no está sometido a fuertes gradientes térmicos (en particular, se asume que la temperatura del agua es casi igual a la del aire y que el transductor no está expuesto a los rayos del sol). Por otro lado, el método de calibración propuesto es empírico, ya que no se cuenta con una ecuación teórica que prediga la forma de las relaciones $\alpha(T)$ y $\beta(T)$. Por lo tanto, y en la medida de lo posible, se debe calibrar el transductor de presión bajo condiciones tales, que las temperaturas registradas durante las pruebas de monitoreo abarquen el rango de temperaturas que se piensa encontrar posteriormente.

También es conveniente observar que los datos obtenidos a partir de las pruebas de monitoreo (pasos 2 y 3 del procedimiento propuesto) pudieran procesarse de una manera distinta a lo propuesto (pasos 4 y 5). O sea, se pudieran ajustar las relaciones $U_0(T)$ y $U_1(T)$ por medio de funciones analíticas y deducir una relación

de la forma:
$$H = \frac{[H_1 - H_0] U + H_0 U_1(T) - H_1 U_0(T)}{U_1(T) - U_0(T)}$$
. En una

etapa preliminar de este trabajo se probó esta forma alternativa de procesar los datos; para los tres transductores de presión que se presentan a continuación se obtuvieron resultados (para ahorrar espacio, éstos no se presentan) casi idénticos a los obtenidos con el método propuesto. Ahora bien, con la forma alternativa de procesar los datos no se puede apreciar la forma de las relaciones $\alpha(T)$ y $\beta(T)$.

Aplicación y evaluación del método propuesto

Equipos usados

Con el fin de probar el método de calibración propuesto, se tomaron tres transductores manométricos Gems-2000 (modelo 2000-R-G-3F0, marca Gems Sensors, Reino Unido). Son moderadamente económicos (≈ 200 dólares), compatibles con el agua, de tipo piezorre-

sistivo, con un intervalo de funcionamiento entre -10 y 10 m, una alimentación eléctrica no regulada (se utilizó una fuente de poder de 12 V) y una señal de salida entre 0 y 5 V. Según el proveedor, la exactitud de estos transductores es ± 25 mm con respecto a la mejor recta de calibración (esto incluye los efectos que se conocen como no *linealidad*, *histéresis* y *repetibilidad*). Según el proveedor, también el transductor está compensado en temperatura y su sensibilidad a la temperatura es ± 3 mm/ $^{\circ}\text{C}$ (en el intervalo $-20 < T < 80$ $^{\circ}\text{C}$). Experimentalmente, se vio que era necesario esperar ≈ 60 min para tener una señal de salida de los transductores más o menos estable, después de haber aplicado la alimentación eléctrica (fenómeno que se conoce como tiempo de calentamiento).

Para monitorear la temperatura ambiente se utilizó una sonda LM-35 (marca National Semiconductors, EUA). Dicha sonda es muy económica (< 2 dólares), de bajo consumo eléctrico (se dejó conectada a una batería alcalina de $+9$ V durante tres meses, sin tener necesidad de cambiar la batería) y con una señal de salida (≈ 10 mV/ $^{\circ}\text{C}$) fácil de medir con un voltímetro o con una tarjeta de adquisición de datos. Según el proveedor, la exactitud del LM-35 es de ± 1.5 $^{\circ}\text{C}$. Durante pruebas preliminares, se calibró y evaluó la sonda, comparándola con un termómetro de mercurio con exactitud de ± 0.5 $^{\circ}\text{C}$ (conforme la norma ASTM-58C, marca Kessler Instruments, EUA). Estas pruebas indicaron que la exactitud de la sonda probada era del orden de ± 0.5 $^{\circ}\text{C}$ cuando la señal de salida de la sonda estaba corregida por medio de un sencillo filtro pasivo (capacitor de 1 μF , resistencia de 85 Ω).

Se utilizó una PC-486 y una tarjeta de adquisición de datos con una resolución de 2.44 mV para un intervalo de -5 a $+5$ V (modelo AT-MIO-16L, marca National Instruments, EUA) para monitorear la serial de salida de los transductores de presión y de la sonda de temperatura. Se utilizó el software *LabVIEW* (marca National Instruments, EUA) para escribir un programa de cómputo que puede monitorear la respuesta de hasta siete transductores con un intervalo de tiempo entre 1 y $3,600$ s. Con el fin de suavizar el ruido de los transductores y también de la tarjeta de adquisición de datos, se determinó cada medición como siendo el promedio de mil lecturas tomadas con una frecuencia de $10,000$ Hz; es decir, cerca de la máxima frecuencia de adquisición de datos de la tarjeta.

Aplicación del método propuesto

Se tomó especial cuidado para purgar los transductores de presión. Esto se hizo con el fin de no atrapar burbujas

de aire dentro de los transductores y de sus conectores (por lo contrario, las mediciones de presión pudieran ser sesgadas por efectos capilares). Primero se llenó la toma de presión de cada transductor con agua caliente (≈ 50 °C); esto, con el propósito de tener menos gas disuelto en el fluido. Luego se fijó un adaptador metálico (marca Swagelok, EUA) a un tubo flexible de teflón (longitud = 1.2 m, $\varnothing = 3$ mm) y se llenó el tubo con agua. Después se unieron el tubo flexible y el transductor de presión por debajo del agua. Por último, se colocó un sello de silicón alrededor de la unión.

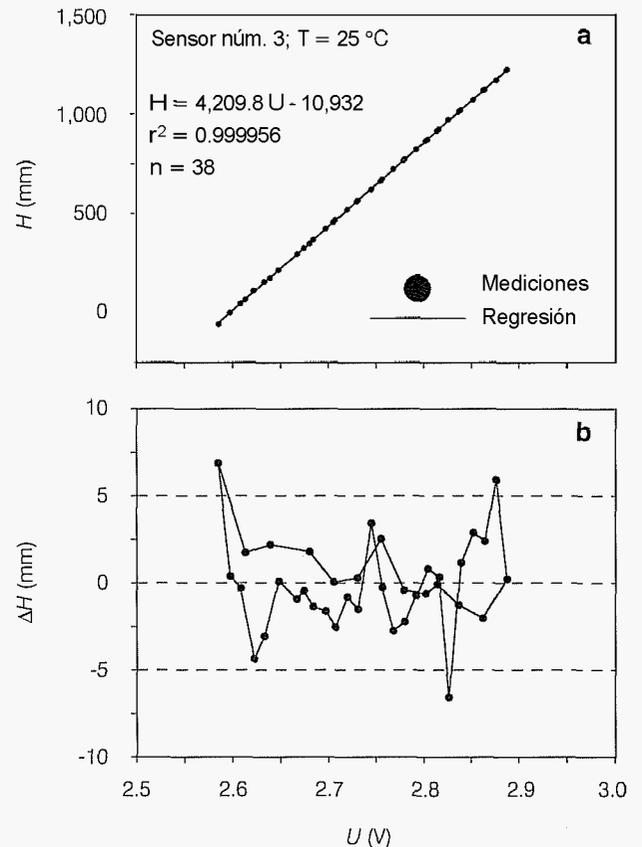
Después de haber purgado un transductor de presión, se colocó la salida de su tubo flexible en un frasco de vidrio (100 ml) lleno de agua, el cual se sujetó a una varilla vertical con una regla de papel milimétrico. Con este dispositivo era posible variar la presión manométrica (cambiando la elevación del nivel del frasco) y relacionarla con la señal de salida de los transductores. En forma preliminar a la aplicación del método de calibración propuesto, se verificó que la respuesta de los transductores probados variaba linealmente con la presión aplicada. Los resultados indicaron que la linealidad de los transductores usados era mejor que ± 8 mm para el intervalo $0 < H < 1,200$ mm y no se detectó ninguna histéresis (ilustración 2).

Después de haber verificado la linealidad de los transductores de presión, se aplicó la metodología de calibración propuesta; durante cinco días, los transductores fueron sometidos a una carga hidráulica pequeña ($H_0=0$ mm) y luego sufrieron durante otros cinco días una carga más grande ($H_1=1,102$ mm). El frasco lleno con agua se cubrió con una hoja de aluminio para reducir la evaporación. Las dos pruebas de calibración se hicieron en el laboratorio de hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), a finales de octubre de 2002.

Experimento complementario

Posteriormente a la calibración de los tres transductores de presión, se hizo un experimento complementario, cuya finalidad era demostrar el interés práctico del método de calibración propuesto. Para eso, se movieron los transductores de presión a otra parte del laboratorio y se colocó la salida de sus tubos flexibles en un tanque cúbico (con una base de 1 m^2) parcialmente lleno de agua. Una de las paredes del tanque era transparente, por lo que era posible ver el nivel del agua y medir el tirante con una escala graduada. Durante dos semanas (del 13 al 26 de noviembre del 2002), se monitoreó la señal de salida de los transductores (U) y la temperatura del aire (T). Los datos de cada transductor se utilizaron

Ilustración 2. Resultado típico de una prueba para verificar la linealidad de los transductores de presión probados (al inicio se incrementó la presión y después se redujo): (a) relación entre la presión aplicada (H) y la señal de salida del transductor (U); (b) residuos de la regresión lineal (ΔH).



para estimar la presión manométrica (H). Dicha presión también se determinó en forma independiente, midiendo el tirante del agua en el tanque con una exactitud de ± 1 mm (por lo menos cada día). A lo largo del experimento, la presión manométrica ha sido pequeña ($H \approx 180$ mm al inicio) y se redujo lentamente debido a la evaporación del agua (≈ 1 mm/d).

Resultados y discusión

Aplicación del método propuesto: análisis preliminar de los datos

Con las dos pruebas de calibración, se observó una cierta correlación entre la señal de salida de los transductores de presión probados y la temperatura ambiente (ilustraciones 3 y 4). Sin embargo, esta correlación no fue

perfecta. Típicamente, se observó que la señal de salida de los transductores presentaba oscilaciones, con un retraso de hasta cuatro horas con respecto a los cambios de temperatura. Además, parece que la señal de salida de los transductores variaba con mayor rapidez cuando la temperatura estaba aumentando, y más lentamente cuando disminuía. La señal de salida del transductor número 3 presentó oscilaciones de mayor amplitud durante las pruebas. La señal de salida del transductor número 2 presentó oscilaciones con una amplitud inferior, pero en sentido opuesto (para ahorrar espacio, no se muestran los datos). Finalmente, la señal de salida del transductor número 1 presentó oscilaciones de amplitud menor que las dos anteriores (para ahorrar espacio, tampoco se muestran los datos).

¿Por qué se obtuvo una respuesta tan compleja de los transductores en función de la temperatura ambiente? Esto puede explicarse por el hecho de que la membrana piezorresistiva de un transductor de presión es sensible a cualquier deformación (Pallás, 2001). En particular, una dilatación de las piezas sobre las cuales está sujeta puede ocasionar un cambio en la señal de salida del transductor. Tratar de predecir teóricamente este fenómeno sería, *a priori*, una tarea muy compleja, porque se requeriría conocer la geometría y las características mecánicas de todas las piezas que constituyen el transductor de presión. Por lo tanto, es

Ilustración 3. Resultado de la primera prueba para incluir la temperatura en la calibración de uno de los tres transductores de presión probados. U_0 es la señal de salida del transductor y T es la temperatura. La presión aplicada a los transductores durante la prueba fue $H_0 = 0$ mm.

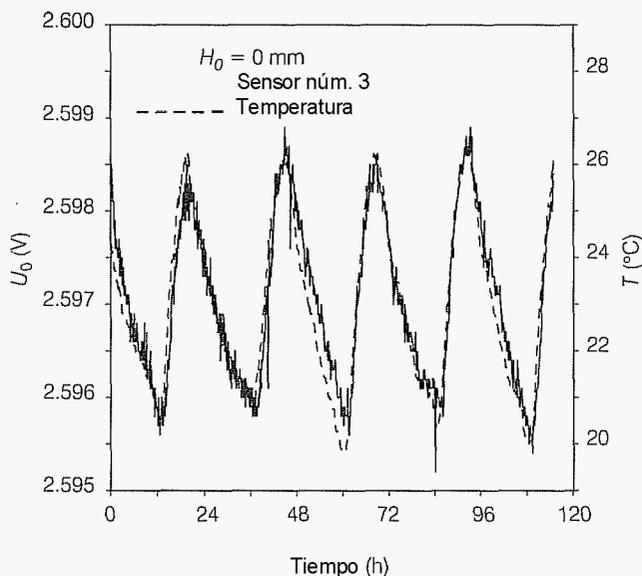
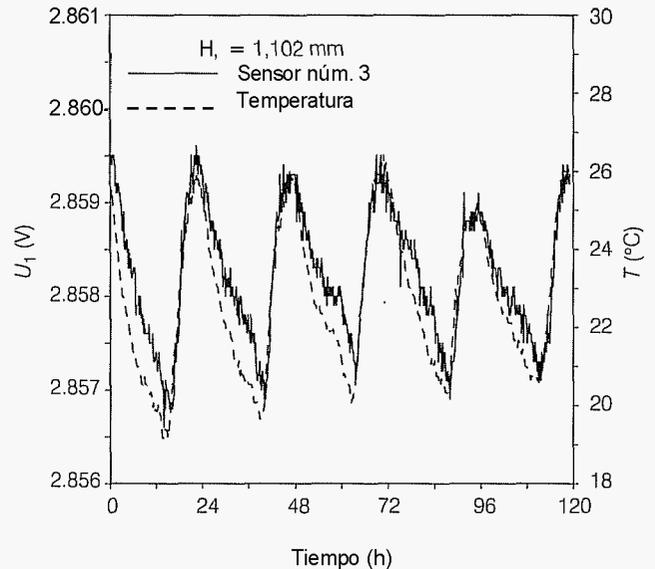


Ilustración 4. Resultado de la segunda prueba para incluir la temperatura en la calibración de uno de los tres transductores de presión probados. La presión aplicada a los transductores durante la prueba fue $H_1 = 1,102$ mm.



más factible en la práctica analizar la respuesta de los transductores de presión en función de la temperatura de una manera empírica. Y en este caso nos parece que el método dinámico propuesto es más adecuado que el método estático (Lowery et al., 1986; Messing y Jarvis, 1993; Renault et al., 1998; Bruckler et al., 2002), ya que la dilatación de las piezas que constituyen el transductor de presión no es instantánea.

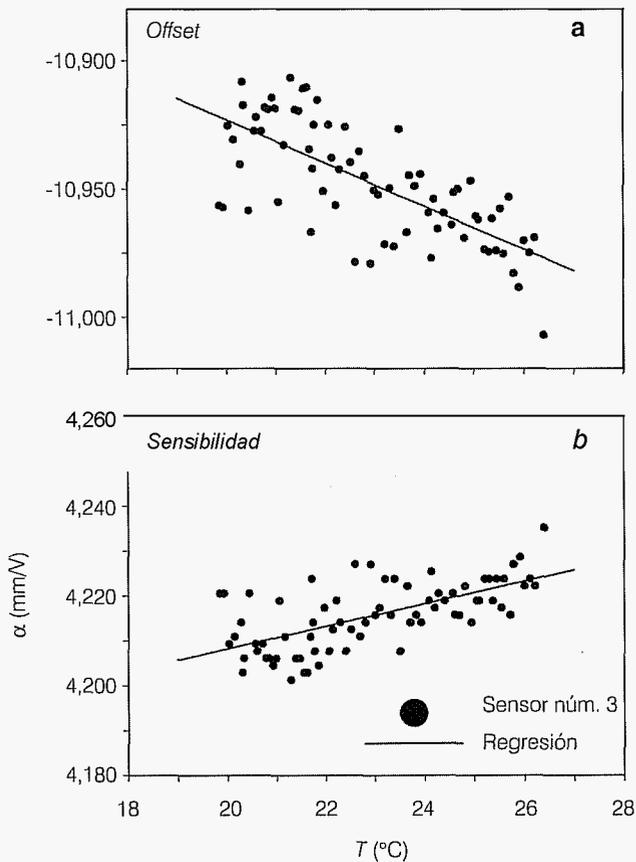
En su estudio sobre un sistema compuesto por un transductor de presión y un mini-tensiómetro, Watson y Jackson (1967) mostraron que la dilatación de los tubos de nylon que usaron como conectores ocasionaba cambios importantes en la presión interna de su sistema de medición. Cuando la conductancia al agua de los tubos que se utilizan como conectores es muy pequeña, este fenómeno puede ser otro motivo para explicar la respuesta compleja de un sistema para medir la presión en función de la temperatura ambiente (aunque en el presente caso, es probable que este fenómeno haya sido de menor importancia, porque se utilizaron tubos relativamente rígidos, cortos y, en comparación con la de un mini-tensiómetro, de alta conductancia).

Aplicación del método propuesto: obtención de un modelo de calibración

En la ilustración 5 se muestra un ejemplo de las relaciones obtenidas entre el offset (β) y la sensibilidad (α)

de un transductor de presión con la temperatura ($20 \leq T \leq 27 \text{ }^\circ\text{C}$). Ninguna de estas relaciones está bien definida (lo que no es sorprendente, por los motivos que se acaban de comentar). En este trabajo se escogió una tendencia lineal para describir la dependencia de α y β

Ilustración 5. Ejemplo de relación experimental entre la temperatura (T) y (a) el *offset*(β) o (b) la *sensibilidad*(α) de un transductor de presión. En este ejemplo se ajustaron las relaciones $\alpha(T)$ y $\beta(T)$ con una recta.



con la temperatura. O sea, se eligió el siguiente modelo para predecir la presión manométrica: $H = (\alpha_0 + \alpha_1 T) U + (\beta_0 + \beta_1 T)$. Como se puede apreciar en el cuadro 1, las correlaciones lineales obtenidas para las relaciones $\alpha(T)$ y $\beta(T)$ fueron bastante débiles ($r^2 < 0.52$). Sin embargo, fueron siempre significativas ($p < 0.001$). Por lo tanto, se encontró que se podía mejorar la exactitud de los transductores de presión probados, tomando en cuenta su sensibilidad a la temperatura.

Quizás se pudieran construir modelos empíricos más sofisticados para predecir el efecto de la temperatura sobre los coeficientes α y β . En particular, utilizar técnicas de regresión multilineal o redes neuronales (por ejemplo, Tamari et al., 1996) para relacionar α y β no solamente con el valor de T registrado al momento de hacer una medición, sino también con valores medidos antes (por ejemplo, algunas horas antes, para saber si la temperatura está bajando o subiendo). Sin embargo, este enfoque solamente sería de utilidad si se piensa que la temperatura ambiente variará según un mismo patrón durante todo el periodo para el cual se pretenden utilizar los transductores de presión.

Experimento complementario: bondad del modelo de calibración obtenido

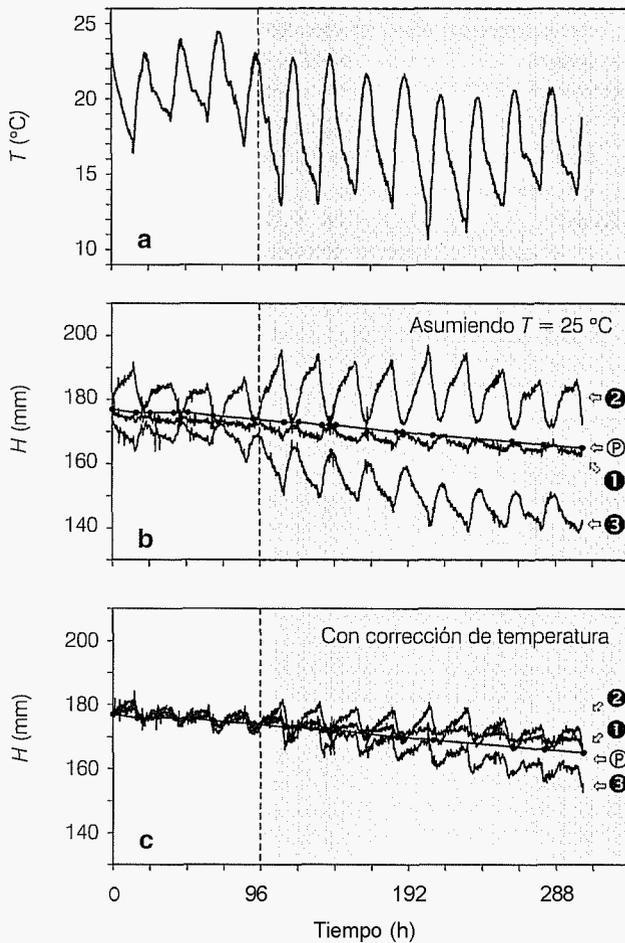
Durante el experimento realizado para verificar la bondad del modelo de calibración obtenido (ver inciso anterior), la temperatura ambiente varió entre 11 y 25 $^\circ\text{C}$ (ilustración 6a). Considerando las especificaciones de los transductores de presión probados (sensibilidad a la temperatura de $\pm 3 \text{ mm}/^\circ\text{C}$), se esperaba entonces que la presión estimada a partir de estos transductores pudiera ser sesgada de hasta $\pm 42 \text{ mm}$, en caso de no hacer una corrección de temperatura (en forma arbitraria se tomó $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$). De hecho, se obtuvieron desviaciones con respecto a los valores de referencia de hasta $\pm 24 \text{ mm}$ (ilustración 6b). Esto es menos de lo especificado por

Cuadro 1. Resultado de la calibración de los transductores de presión probados. El modelo de regresión propuesto es $H = (\alpha_0 + \alpha_1 T) U + (\beta_0 + \beta_1 T)$, donde H es la presión; U , el voltaje medido, y T , la temperatura ambiente ($20 < T < 27 \text{ }^\circ\text{C}$).

Transductor núm.	$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 T$			$\beta = \beta_0 + \beta_1 T$			n
	α_0 (mm V ⁻¹)	α_1 (mm V ⁻¹ °C ⁻¹)	r^2	β_0 (mm)	PI (mm °C ⁻¹)	r^2	
1	4,198.9	1.5177	0.286 **	-10,905	-4.5125	0.328 **	72
2	4,167.1	2.6023	0.450 **	-10,823	-5.6346	0.345 **	72
3	4,158.0	2.5091	0.414 **	-10,755	-8.4020	0.512 **	72

**Correlación significativa (t-test, $p < 0.001$).

ilustración 6. Resultados del experimento realizado para evaluar la bondad del método de calibración propuesto: (a) temperatura ambiente (T), (b) presiones estimadas (H) con los transductores sin tomar en cuenta la temperatura, (c) presiones estimadas (H) con los transductores cuando se toma en cuenta la temperatura. La curva "P" corresponde a la presión manométrica de referencia, mientras que los números corresponden a los tres transductores de presión probados.



el fabricante de los transductores, aunque del mismo orden de magnitud. Además, es interesante observar que las presiones estimadas a partir de los transductores sin corrección de temperatura presentaron oscilaciones con características distintas en cuanto a su sentido y magnitud. Esto es consistente con el hecho de que la sensibilidad a la temperatura de los tres transductores no es exactamente la misma (ver cuadro 1), a pesar de que son del mismo modelo.

En la ilustración 6c se presentan las presiones estimadas a partir de los transductores cuando se utiliza el modelo de calibración que toma en cuenta

la temperatura ambiente (datos del cuadro 1). En este caso, se tuvieron desviaciones con respecto a los valores de referencia no mayores a ± 5 mm durante los cuatro primeros días del experimento. Esto corresponde a una mejoría de hasta 75% en la exactitud de los transductores probados. Después, las desviaciones aumentaron, aunque permanecieron siempre menores a ± 12 mm. ¿Por qué las desviaciones aumentaron un poco a partir del quinto día del experimento? Esto puede explicarse por el hecho de que solamente hasta el cuarto día la temperatura se mantuvo dentro del intervalo para el cual los transductores se habían calibrado (o sea, entre 20 y 27 $^{\circ}\text{C}$). Después, se tuvieron temperaturas mínimas fuera del intervalo de calibración a causa de una onda fría (ver zona en gris de la ilustración 6a). De todos modos, el método propuesto permitió reducir en más de un 50% el error de medición con los transductores de presión durante todo el experimento realizado.

Conclusión

Los resultados experimentales obtenidos indican que la respuesta de un transductor de presión a la temperatura es un fenómeno complejo, difícil de describir con un modelo teórico. Sin embargo, es factible corregir en forma empírica el efecto de la temperatura sobre un transductor de presión. En este trabajo se propone un método sencillo para hacerlo, el cual requiere de un sensor de temperatura y un sistema de adquisición de datos. *A priori*, el método puede usarse para cualquier situación, siempre y cuando los transductores de presión no estén expuestos a fuertes gradientes térmicos y cuando las condiciones climáticas del lugar de trabajo no cambien demasiado.

Recibido: 26/11/2003
Aprobado: 02/02/2004

Referencias

- BRUCKLER, L., BERTUZZI, P., ANGULO-JARAMILLO, R. y RUY S. Testing an infiltration method for estimating soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 66, 2002, pp. 384-395.
- CARRERA MÉNDEZ, R. y VERDE RODARTE, C. Localizador automático de fugas en un ducto. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. 16, 2001, pp. 139-151.
- CONSTANZ, J. y MURPHY, F. An automated technique for flow measurements from Mariotte reservoirs. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 51, 1987, pp. 252-254.

- FUENTES MARILES, O.A. y ROSALES PLASCENCIA, I.L. Estimación de pérdidas locales de energía en tomas domiciliarias de agua potable. *Ingeniería hidráulica en México*, Vol. 19, 2004, pp. 65-73.
- LOWERY, B., DATIRI, B.C. y ANDRASKI, B.J. An electrical readout for tensiometers. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 50, 1986, pp. 494-496.
- MARTÍNEZ AUSTRIA, P. Estudio experimental del funcionamiento de vertedores con cargas altas. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. 3, 1988, pp. 9-17.
- MESSING, I. y JARVIS N.J. Temporal variation in the hydraulic conductivity of a tilled clay soil as measured by tension infiltrometers. *Journal of Soil Science*. Vol. 44, 1993, pp. 11-24.
- PALLÁS ARENY, R. Sensores y acondicionadores de señal. Tercera edición. México: Alfaomega, 2001, 480 pp. ISBN 970-15-0577-8.
- PRADO-HERNÁNDEZ, J.V., DE LEÓN-MOJARRO, B., RUIZ-CARMONA, V.M., EXEBIO-GARCÍA, A. y MEJÍA-SÁENZ, E. Evaluación experimental de algoritmos de control de canales de riego. *Agrociencia*. Vol. 37, 2003, pp. 393-403.
- RENAULT, P., MOHRATH, D., GAUDU, J.C. y FUMANAL, J.C. Air pressure fluctuation in a prairie soil. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 62, 1998, pp. 553-563.
- TAMARI, S., GAUDU, J.C. y SIMONNEAU, T. Tensiometric measurement and metaestable state of water under tension. *Soil Science*. Vol. 156, 1993, pp. 149-155.
- TAMARI, S., WOSTEN, J.H.M. y RUIZ-SUÁREZ, J.C. Testing an artificial neural network for predicting soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 60, 1996, pp. 1732-1741.
- WATSON, K.K. y JACKSON, R.D. Temperature effects in a tensiometer-pressure transducer system. *Soil Science Society of America Proceedings*. Vol. 31, 1967, pp. 156-160.

Abstract

TAMARI, S., LÓPEZ-VÁZQUEZ, A. & CABRERA, M.A. A simple method for including temperature in the calibration curve of a pressure transducer. *Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XX, no. 1, January-March, 2005, pp. 19-27.

Differential and water-compatible pressure transducers are widely used in hydraulics, agronomy and hydrology. However, it has been known for a long time that the response of such transducers can be significantly affected by temperature changes, even if the transducer has an integrated temperature compensator. This study describes a simple method for including the temperature in the calibration curve of a pressure transducer. The method does not require a thermostated enclosure, but a temperature sensor and a data logger: the transducer is placed where it is planned to be used and its response is monitored for some days together with the ambient temperature. As an application example, some results obtained in the laboratory with three pressure transducers are shown. The proposed method reduced the measurement error of the tested transducers by more than 50%. It was also found that the sensitivity to temperature of the transducers was not the same, even though they were of the same model. This study demonstrates that the accuracy of a pressure transducer can be improved by taking into account empirically its sensitivity to temperature.

Keywords: pressure sensor, calibration, thermal effect, data logger, pressure head, piezometry, tensiometry.

Dirección institucional de los autores:

Serge Tamari
Alejandro López-Vázquez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
Paseo Cuauhnahuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, México,
C.P. 62550,
teléfono: + (52) (777) 3 29 36 00,
tamari@tlaloc.imtia.mx

Marco Antonio Cabrera

Ingeniería y Metrología S.A. de C.V.
Salvatierra 32-1 Bis, Col. San Bartolo, Atepehuacan, México, D.F.,
CP 07730,
teléfono: + (52) (55) 57 54 30 87,
marco@inymet.com.mx