

INFLUENCIA DE LAS DIMENSIONES Y DE LA DISPOSICIÓN TÉRMICA EN LA RESPUESTA DE TERMOPILAS USADAS COMO SENSORES EN CALORIMETRÍA DE CONDUCCIÓN DE CALOR

Liliana Giraldo G.*, Juan Carlos Moreno P.**

Recibido: 26/10/02 Aceptado: 29/11/02

Palabras clave: termopila, sensor térmico, calorimetría de conducción de calor.

Key words: Thermopile, sensor thermic, heat conduction calorimetry.

RESUMEN

Se determina la sensibilidad y estabilidad para tres tipos de termopilas, con diferentes dimensiones, pero con igual número de termocoplas.

Se obtienen sensibilidades que crecen a medida que aumenta el área de cubrimiento de la superficie que genera el efecto térmico: $0,022 \text{ VW}^{-1}$, para la termopila con área de 1764 mm^2 ; de $0,011 \text{ VW}^{-1}$ para las termopilas con un área de 1024 mm^2 , y para las termopilas con área de 882 mm^2 se presenta la menor sensibilidad, de $0,009 \text{ VW}^{-1}$. La estabilidad permanece constante para todas las termopilas sin importar sus dimensiones.

Cuando se unen las termopilas en serie su sensibilidad depende del contacto

térmico con la superficie que genera el calor.

ABSTRACT

For three types of thermopiles with different dimensions but with the same number of thermocouples, the sensitivity and stability were determined.

Sensibilities increase as the covered surfaces which generate the thermal effect, increase in area: $0,022 \text{ VW}^{-1}$, for the thermopile with area of 1764 mm^2 ; $0,011 \text{ VW}^{-1}$ for the thermopile with an area of 1024 mm^2 and for the thermopile with an area of 882 mm^2 a sensitivity of $0,009 \text{ VW}^{-1}$ was observed, which is the lowest. Stabilities remain constant for all the thermopiles irrespective of their dimensions.

When thermopiles join in series the sensitivities depends on thermal contact with the generating heat surface.

* Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Correo electrónico: ligira@ciencias.ciencias.unal.edu.co

** Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: jumoreno@uniandes.edu.co

INTRODUCCIÓN

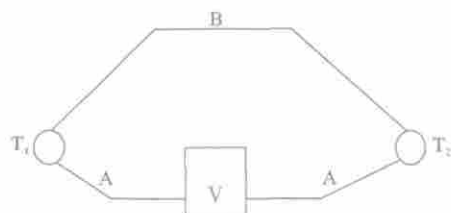
En la última década se han empleado los elementos termoeléctricos (termocuplas, termistores, termopilas) como sensores de temperatura y de flujo de calor en los equipos calorimétricos, dada su capacidad para convertir la energía térmica en señal de potencial o de resistencia eléctrica que son relativamente fáciles de medir con los multímetros adecuados.

Las termopilas, que están constituidas por la unión de muchas termocuplas de conductores metálicos, o las más modernas construidas de materiales semiconductores, se rigen por dos de los efectos termoeléctricos: efecto Seebeck y efecto Peltier, descubiertos desde mediados del siglo XIX (1).

Efecto Seebeck

La figura 1A es la representación esquemática y simple de una termocupla, que es la unidad fundamental de una termopila de uniones metálicas. La termocupla está hecha con los pares A-B y B-A, donde A y B son dos conductores diferentes. Si las dos uniones A-B y B-A están a

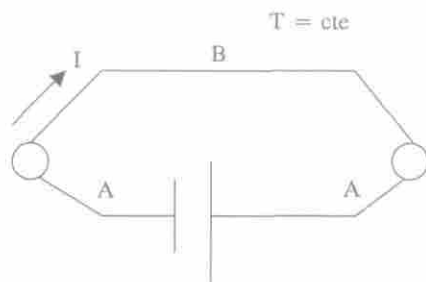
DIAGRAMA DE UNA TERMOPILA



A y B conductores metálicos
V potencial eléctrico proporcional a las temperaturas T_1 y T_2

Figura 1A. Efecto Seebeck

DIAGRAMA DE UNA TERMOPILA CON PASO DE CORRIENTE



A y B conductores metálicos
Temperatura constante, I intensidad de corriente

Figura 1B. Efecto Peltier.

diferente temperatura, T_1 y T_2 , una fuerza electromotriz V , se genera en el circuito. La magnitud de V depende de la naturaleza de los conductores A y B, como también de la diferencia de temperatura entre T_1 y T_2 ; si ésta es pequeña, lleva a la definición del coeficiente Seebeck, ϵ :

$$\epsilon = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{dV}{dT} \quad (1)$$

De acuerdo con los materiales escogidos para formar la unión, la caída de potencial V puede ser positiva o negativa en dirección de la disminución de la temperatura (2, 3). Una termopila se compone de n termocuplas unidas en serie, de tal forma que la fuerza electromotriz total de la pila es nV (4).

Efecto Peltier

Si en la figura 1A se reemplaza el voltímetro por una fuente de poder para producir en el circuito una corriente i , y se supone que antes de pasar la corriente, el sistema permanece a una temperatura uniforme T (figura 1B), durante el paso de corriente una de las uniones comienza

a calentarse mientras la otra se enfría; un cambio en la dirección de la corriente produce que la unión caliente se enfríe, y la fría se caliente. Este fenómeno se conoce como efecto Peltier (4).

La potencia calorífica que se presenta en cada unión es proporcional a la corriente

$$P = \pi i \quad (2)$$

donde π es el coeficiente Peltier para la termocupla A-B a la temperatura T. En la práctica, el efecto Peltier en la unión se superpone con el efecto Joule que se produce por el paso de la corriente a través del circuito; este último es de la forma i^2R y siempre es positivo, mientras que el signo del efecto Peltier depende de la dirección de la corriente i . El flujo de calor en la unión está dado por (4,5):

$$P = \pm \pi i + Ri^2 \quad (3)$$

Termopilas de semiconductores

Las termopilas de materiales semiconductores empleadas en la calorimetría de conducción de calor son elementos de estado sólido, constituidas por una aleación cuaternaria de bismuto, telurio, selenio y antimonio, que proporciona al material un dopado y una orientación policristalina con propiedades termoeléctricas anisotrópicas. La figura 2 muestra el esquema de una termopila en el que se puede observar que los elementos semiconductores de tipo P y N están conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. En la tabla 1 se resumen las características generales de las termopilas que se usan en este trabajo (6).

Este trabajo muestra las medidas de sensibilidad y estabilidad de tres tipos de termopilas, marca Tellurex, con diferentes dimensiones, para observar cómo se afectan dichos parámetros con el tamaño de las termopilas, la unión de éstas en se-



Figura 2. Esquema de una termopila.

Tabla 1. Características térmicas y eléctricas de las termopilas

| | |
|------------------------|------------------------------|
| Coefficiente Seebeck | $2,0 \times 10^{-4}$ V/°K |
| Resistividad eléctrica | $1,0 \times 10^{-3}$ Ohm cm |
| Conductividad térmica | $1,5 \times 10^{-2}$ w/cm °K |
| Número de cuplas | 127 |

rie y con su disposición dentro de depósitos de calor.

METODOLOGÍA

Se escogen tres referencias de termopilas comerciales, marca Tellurex, cuya diferencia está representada en las dimensiones que son, para cada una de éstas, las siguientes, y que se denominan de acuerdo a su tamaño, termopila tipo 1, 2 ó 3:

Termopilas tipo 1, 42 x 42 x 3,8 mm

Termopilas tipo 2, 32 x 32 x 4,0 mm

Termopilas tipo 3, 42 x 21 x 3,8 mm

En la figura 3 se muestra el montaje que se realiza para obtener la sensibilidad y es-

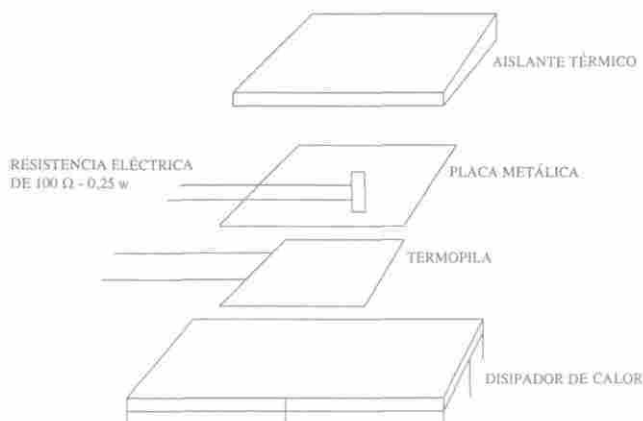


Figura 3. Disposición térmica para determinar la sensibilidad de las termopilas.

tabilidad de los termoelementos y comparar la forma como éstas se ven afectadas por su geometría, dado que se cambian las longitudes de los lados y se procura que el espesor sea el mismo en las tres referencias –llamadas para este trabajo tipos–; el número de termocuplas de los tres tipos de termopilas es el mismo, 127.

Determinación de la sensibilidad y estabilidad de cada termopila

La sensibilidad de cada termoelemento se determina al disipar una potencia eléctrica entre aproximadamente 38 y 40 mW por medio de una resistencia de 100 ohmios y 0,25 de W, que se coloca en el interior de una placa de aluminio en contacto con la termopila; para ello se ajusta en una fuente de poder regulada Hewlett-Packard 6114A, un potencial de aproximadamente 3,0 V., y se lee la intensidad de corriente que pasa a través de la resistencia; cada 30 segundos se toman lecturas del potencial de salida de la termopila, con un multímetro de precisión Hewlett-Packard 3478A, hasta obtener una diferencia de voltaje de salida de la termopila, ΔE_T , estacionario. La sensibilidad se halla al relacionar este último con la potencia de estado estacionario disipada en la resistencia (7,8).

La estabilidad en el potencial de salida de la termopila se halla mediante lecturas de poten-

cial en función del tiempo, para diferentes períodos de tiempo entre 3600 y 15000 segundos.

Las determinaciones se llevan a cabo a temperatura ambiente, con el conjunto aislado en un recipiente cúbico de cartón, que a su vez se coloca en otro de icopor de mayor tamaño.

Determinación de la sensibilidad para conjuntos de termopilas unidas en serie

Para observar cómo se afecta la sensibilidad cuando se unen termopilas en serie se realizan dos tipos de ensayos. En el primero se unen dos termopilas del tipo 1 en serie y se colocan una a cada lado de la placa de aluminio que contiene la resistencia eléctrica de calentamiento y se disipan distintas potencias eléctricas entre 1 y 40 mW, la sensibilidad se determina de igual forma que en el caso anterior, con lecturas cada 30 segundos del potencial de salida de la termopila con un multímetro de precisión Hewlett-Packard 3478A, hasta obtener una diferencia de voltaje de salida de la termopila, ΔE_T , estacionario.

Esta prueba también se hace con dos termopilas tipo 3, disipando potencias eléctricas entre 8 y 40 mW.

El segundo ensayo se lleva a cabo al unir en serie cuatro termopilas tipo 2 –que tienen las dimensiones intermedias–, que

se colocan dentro de un depósito de calor de aluminio cilíndrico de 90 mm de diámetro y 100 mm de altura que tiene labrados en su interior los espacios para alojar las termopilas. En el centro de esta disposición geométrica se coloca una resistencia de 25 ohmios – 5 W, para disipar potencias entre 40 y 500 mW. El conjunto se coloca en un termostato de aire a $25 \pm 0,01^\circ\text{C}$. Se determina la sensibilidad. En la figura 4 se muestra un esquema del conjunto; las cuatro termopilas tipo 2 señaladas por las letras C, D, E y F se unen en serie para formar un circuito capaz de sensar la potencia que se disipa en el centro, los cuatro sensores se colocan dentro del depósito de calor en una posición fija.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las tablas 2, 3 y 4 se muestran los resultados obtenidos de sensibilidad y estabilidad para los tres tipos de termopilas. En éstas aparecen, el número asignado a cada termopila, el voltaje de calentamiento

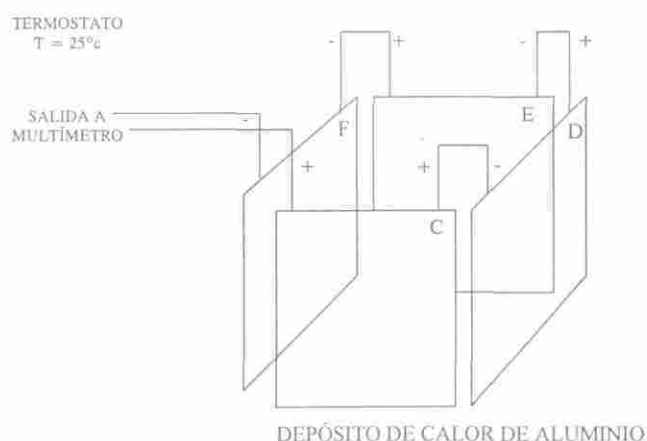


Figura 4. Circuito de cuatro termopilas instaladas en un depósito de calor de aluminio.

Tabla 2. Determinación de la sensibilidad y estabilidad de las termopilas tipo 1

| Termopila | Vc (Voltios) | Potencia (mW) | Sensibilidad (VW-1) | Estabilidad (μ V) |
|-----------|-----------------|------------------|------------------------|---------------------------|
| A* | 2,98 | 39,8 | 0,022 | 21 |
| | 2,97 | 39,9 | 0,021 | 23 |
| | 3,01 | 40,2 | 0,021 | 22 |
| | 2,96 | 39,6 | 0,022 | 24 |
| | 3,02 | 40,5 | 0,022 | 21 |
| Termopila | Vc (Voltios) | Potencia (mW) | Sensibilidad (VW-1) | Estabilidad (μ V) |
| B* | 3,00 | 39,9 | 0,022 | 22 |
| | 3,02 | 40,5 | 0,022 | 22 |
| | 2,98 | 40,1 | 0,021 | 21 |
| | 3,04 | 40,6 | 0,022 | 23 |
| | 3,03 | 40,3 | 0,021 | 23 |

* La denominación A y B indica que son dos termoelementos diferentes, del tipo 1, es decir con dimensiones 42 x 42 x 3,8 mm.

to que pasa a través de la resistencia, Vc, en voltios; la Potencia de calentamiento, en mW; la Sensibilidad, VW^{-1} y la Estabilidad en μ V.

Como se puede observar, se obtienen diferentes valores para la sensibilidad de cada uno de los tipos de termopilas escogidas y ésta aumenta al aumentar el área de cubrimiento del termoelemento; así, para las termopilas tipo 1 con un área de 1764 mm² se tiene la sensibilidad más, alta de 0,022 VW^{-1} ; las termopilas tipo 2 con un área de 1024 mm² presentan una sensibilidad de 0,011 VW^{-1} y las termopilas tipo 3 con área de 882 mm² tienen la menor sensibilidad, de 0,009 VW^{-1} , aunque estos sensores se han elegido con el mismo número de termocuplas, lo cual es directamente proporcional al potencial de salida. De esto se observa la importancia que tiene el área de contacto entre la termopila y la fuente que genera y disipa el

calor; para el caso de la calorimetría de conducción de calor las celdas donde se genera el efecto térmico deben estar cubiertas, de ser posible, en buena parte de su área física conductora. En la gráfica 1 se muestran tres curvas típicas de potencial de salida de la termopila en función del tiempo para cada tipo de termopila, se observa cómo el potencial de estado estacionario disminuye con el tamaño de la termopila cuando se disipa siempre la misma potencia eléctrica, 40 mW. En lo referente a la estabilidad, ésta no se modifica de manera notable con el cambio en las dimensiones y es alta (del orden de 20 a 25 μ V para todas las termopilas).

En la literatura se registra (1-3) que el efecto de unir las termopilas en serie es el de aumentar la capacidad de respuesta dado que equivale a aumentar el número de termocuplas que responden a los efectos térmicos. En las tablas 5 y 6 se encuen-

Tabla 3. Determinación de la sensibilidad y estabilidad de las termopilas tipo 2

| Termopila | Vc (Voltios) | Potencia (mW) | Sensibilidad (VW ⁻¹) | Estabilidad (μV) |
|-----------|-----------------|------------------|-------------------------------------|---------------------|
| C* | 3,04 | 40,6 | 0,011 | 20 |
| | 3,03 | 40,3 | 0,011 | 20 |
| | 3,02 | 40,3 | 0,011 | 21 |
| | 3,04 | 40,6 | 0,011 | 23 |
| | 2,55 | 38,9 | 0,011 | 22 |
| Termopila | Vc (Voltios) | Potencia (mW) | Sensibilidad (VW ⁻¹) | Estabilidad (μV) |
| D* | 3,15 | 40,0 | 0,011 | 21 |
| | 3,11 | 39,9 | 0,010 | 20 |
| | 3,13 | 40,6 | 0,010 | 20 |
| | 3,15 | 41,0 | 0,010 | 22 |
| | 3,11 | 40,4 | 0,011 | 21 |
| Termopila | Vc (Voltios) | Potencia (mW) | Sensibilidad (VW ⁻¹) | Estabilidad (μV) |
| E* | 3,01 | 40,2 | 0,010 | 21 |
| | 3,02 | 40,2 | 0,010 | 23 |
| | 3,04 | 40,6 | 0,011 | 24 |
| | 3,04 | 40,5 | 0,011 | 23 |
| | 3,03 | 40,4 | 0,011 | 21 |
| Termopila | Vc (Voltios) | Potencia (mW) | Sensibilidad (VW ⁻¹) | Estabilidad (μV) |
| F* | 3,02 | 39,0 | 0,011 | 21 |
| | 2,97 | 38,5 | 0,010 | 22 |
| | 2,98 | 38,8 | 0,010 | 22 |
| | 3,00 | 39,1 | 0,010 | 23 |
| | 2,98 | 39,2 | 0,010 | 23 |

* La denominación C, D, E y F indica que son cuatro termoelementos diferentes, del tipo 2, es decir con dimensiones 32 x 32 x 4,0 mm.

tran los resultados de sensibilidad para uniones en serie de termopilas tipo 1 y tipo 3 respectivamente; en éstas se encuentran la potencia de calentamiento, en mW; la diferencia de potencial de salida de las termopilas, en mV, y la sensibilidad en VW⁻¹.

Los resultados son interesantes porque para el caso de las termopilas 1, la sensibilidad se duplica al unir en serie los dos termoelementos, dado que se obtiene un valor de 0,044 VW⁻¹ y la sensibilidad individual es de 0,022 VW⁻¹; en el caso de la unión de las termopilas tipo 3, la sensi-

Tabla 4. Determinación de la sensibilidad y estabilidad de las termopilas tipo 3

| Termopila | Vc (Voltios) | Potencia (mW) | Sensibilidad (VW ⁻¹) | Estabilidad (μV) |
|-----------|--------------|---------------|----------------------------------|------------------|
| G* | 2,97 | 39,6 | 0,009 | 22 |
| | 2,97 | 39,8 | 0,009 | 25 |
| | 2,98 | 39,9 | 0,010 | 26 |
| | 2,98 | 39,9 | 0,009 | 24 |
| | 3,00 | 40,1 | 0,009 | 23 |
| Termopila | Vc (Voltios) | Potencia (mW) | Sensibilidad (VW ⁻¹) | Estabilidad (μV) |
| H* | 3,01 | 40,1 | 0,009 | 26 |
| | 2,99 | 40,1 | 0,009 | 26 |
| | 2,97 | 39,7 | 0,009 | 24 |
| | 3,02 | 40,2 | 0,009 | 24 |
| | 2,98 | 39,9 | 0,009 | 24 |

* La denominación G y H indica que son dos termoelementos diferentes, del tipo 3, es decir con dimensiones 42 x 21 x 3,8 mm.

Tabla 5. Determinación de la sensibilidad para un conjunto de dos termopilas tipo 1 unidas en serie

| Potencia (mW) | ΔE (mV) | Sensibilidad (VW ⁻¹) |
|---------------|---------|----------------------------------|
| 1,11 | 0,049 | 0,044 |
| 2,16 | 0,096 | 0,044 |
| 4,23 | 0,187 | 0,044 |
| 8,53 | 0,390 | 0,045 |
| 16,1 | 0,732 | 0,045 |
| 40,1 | 1,76 | 0,044 |

Tabla 6. Determinación de la sensibilidad para un conjunto de dos termopilas tipo 3 unidas en serie

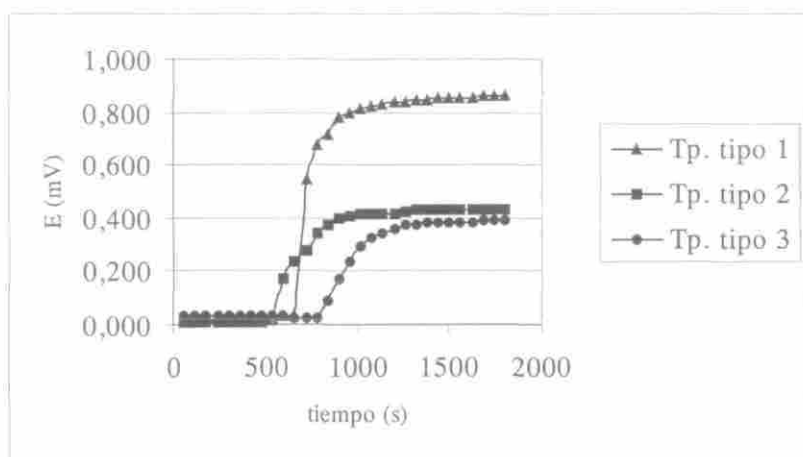
| Potencia (mW) | ΔE (mV) | Sensibilidad (VW ⁻¹) |
|---------------|---------|----------------------------------|
| 8,64 | 0,138 | 0,016 |
| 16,2 | 0,243 | 0,015 |
| 32,9 | 0,526 | 0,016 |
| 40,5 | 0,652 | 0,016 |

bilidad también aumenta pero en una magnitud menor, no en el doble como ocurre con las primera termopilas, así la sensibilidad individual es de 0,009 VW⁻¹ y la de la unión de dos de estas en serie de 0,016 VW⁻¹. Se verifica entonces la conveniencia de la unión en serie de las termopilas.

Finalmente, en la tabla 7 se consignan los resultados de la sensibilidad que se en-

Tabla 7. Determinación de la sensibilidad para un conjunto de cuatro termopilas tipo 2 unidas en serie y dispuestas en un depósito de calor de aluminio

| Potencia (mW) | ΔE (mV) | Sensibilidad (VW ⁻¹) |
|---------------|---------|----------------------------------|
| 359 | 6,38 | 0,018 |
| 199 | 4,12 | 0,020 |
| 138 | 2,59 | 0,019 |
| 89,2 | 1,71 | 0,019 |

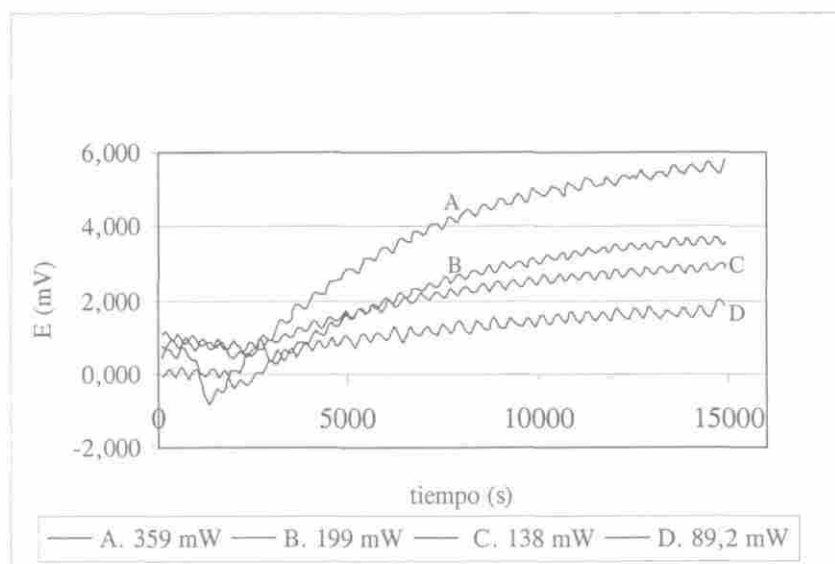


Gráfica 1. Determinación de la sensibilidad para cada tipo de termopila.

cuenta cuando se unen cuatro termopilas tipo 2 en serie; el ensayo se realiza con este tipo de termopilas porque son las que presentan una sensibilidad intermedia.

Aquí, a pesar de tener cuatro termopilas unidas en serie, la sensibilidad no es

cuatro veces la del termoelemento individual, ya que se obtienen valores de $0,020 \text{ VW}^{-1}$ para el conjunto, y de forma individual un valor de $0,011 \text{ VW}^{-1}$, es decir, aproximadamente el doble. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el contacto térmico con la fuente de calor ya no es tan



Gráfica 2. Determinación de la sensibilidad conjunto termopilas depósito de calor.

eficiente, y el calor debe ser conducido a través del depósito hacia los sensores, tal como ocurre en una experiencia calorimétrica típica; estos resultados reafirman la importancia de la calibración eléctrica en calorimetría.

La gráfica 2 muestra las curvas de potencial en función del tiempo para estos ensayos. Vale señalar que en estas curvas se observan las variaciones térmicas que se presentan por la señal de rizo que genera el termostato, que verifica la sensibilidad del conjunto sensor.

CONCLUSIONES

Por medio de curvas de potencial en función del tiempo se observa que permiten calcular la sensibilidad, y que la respuesta en la señal de potencial de salida de las termopilas depende de su área de contacto con la fuente emisora.

Unir termopilas en serie permite aumentar la sensibilidad, pero ésta también depende del buen contacto térmico entre el sensor y la fuente emisora de calor, y de la manera como los sensores estén colocados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Gray, P.E. (1960). The dynamic behavior of thermoelectric devices. Ed. John Wiley & sons: New York, pp. 5-15.
2. Kraus, A.D.; Bar-Cohen, A. (1983). Thermal Analysis and Control of Electronic Equipment. Ed. McGraw Hill, Co.: New York, p. 435.
3. Zemansky, M.W.; Dittman R.H. (1984). Calor y termodinámica. 6^a. Edición. Ed. McGraw Hill: Madrid.
4. Calvet, E.; Prat H. (1963). Recent progress in microcalorimetry. Edited by H.A. Skinner. The MacMillan Company: New York.
5. Hemminger, W.; Hohne G. (1984). Calorimetry fundamentals and practice. Ed. Verlag Chemie: Florida. pp. 121-123.
6. Catálogo Tellurex Corporaton. Thermoelectris. Michigan, U.S.A. 2000 [www. Tellurex.comm](http://www.Tellurex.comm).
7. Giraldo L. Construcción de un microcalorímetro de conducción de calor de flujo y su aplicación en la determinación de entalpías de transferencia de solutos. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Química. Bogotá. 1997. p. 42.
8. Giraldo, L.; Moreno, J.C. (2000). Thermal and electric characterization of the sensor system in the microcalorimetry of heat conduction. Inst. Science & Tech., 28 (3) 223.