

APLICACION DE SENSORES DE FLUJO DE CALOR AL ESTUDIO DE FENÓMENOS DE EVAPORACIÓN

RUBIO L.¹, MUÑOZ PUNTES E.¹, CHERNIKOFF R.², SINI S.¹, POSSA H.¹

¹Departamento de Ingeniería y Gestión. ²Departamento Físico – Matemática Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria. San Martín 352, San Rafael (Mza.), Argentina, Telefax: +54-2627-421947/433171 E-mail: larubio@fcai.uncu.edu.ar

Resumen

Al pretender aplicar los sensores de flujo de calor, desarrollados para aplicaciones en alta tecnología, a intercambiadores tubulares como los equipos de evaporación de alimentos fluidos, surgen distintos problemas de índole tanto teórica como experimental. En este trabajo se enumeran estos problemas y experimentalmente se detectan los más importantes, implementándose las soluciones que permiten salvarlos.

La investigación desarrollada evaluó aspectos teóricos con objeto de poder comprender el funcionamiento de los sensores de flujo de calor y las perturbaciones que causan errores en su utilización; y se experimentó desarrollando un método de montaje y un sistema de lectura y registro de las señales que permitan el uso satisfactorio de estos instrumentos en equipos de evaporación que permitan determinar los valores locales tanto de temperaturas como de flujos de calor para entonces establecer su vinculación con el comportamiento total del equipo.

Experimentalmente se han superado los problemas que se presentaron y se logró obtener valores con la suficiente precisión y estabilidad como para utilizarlos en aplicaciones de ingeniería de alimentos.

1. Introducción

La ecuación de Fourier muestra la relación entre el flujo de calor por conducción y aquellos parámetros de los que depende:

$$\frac{q}{A} = \frac{k}{x} \cdot \Delta T \quad (1)$$

Donde:

q / A	Densidad de flujo de calor	[kcal / hr. m ²]
k	Conductividad térmica del material	[kcal / hr. m .°C]
x	Espesor del material	[m]
A	Área a través del cual pasa el calor	[m ²]
ΔT	Gradiente de temperatura	[°C]

Esto expresa que la diferencia de temperatura entre dos caras de un material con resistencia térmica es proporcional al flujo del calor.

Si se dispone de instrumentos para medición superficial de temperatura se puede utilizar la ecuación de Fourier para determinar directamente densidad de flujo de calor. Efectivamente, conociendo la conductividad térmica de la pared, su espesor y la temperatura en ambas caras (Figura 1), se determina por aplicación directa de la ecuación.

Las termocuplas o termopares han mostrado ser el tipo de termómetro adecuado para la medición de temperaturas superficiales. Una termocupla genera una fuerza electromotriz (FEM) que es proporcional a la diferencia de temperaturas entre la junta de medición (en contacto con la pared) y la de referencia. Colocando una termocupla de cada lado de una pared de material y espesor conocidos se puede determinar el flujo de calor que lo atraviesa (Figura 1)

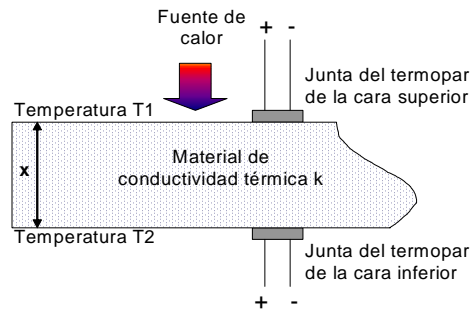


FIGURA 1: Vista esquemática del sensor de flujo de calor en su configuración más simple.

Más sencillo aún es conectar las dos termocuplas de forma tal que la FEM generada por una se reste de la generada por la otra, tal como si fueran dos pilas (con distinta carga) que se conectan invertidas. La salida es la diferencia entre las tensiones generadas por cada una de ellas y será directamente proporcional al flujo de calor.

Como la corriente generada por la disposición de dos termopares es muy débil, normalmente se recurre al uso de varios termopares dispuestos en serie de modo de aumentar el valor de la corriente de salida. De tal forma lo que se tiene es un sensor de temperatura diferencial muy sensible conocido como termopila, las que pueden detectar fácilmente diferencias de $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$

Un sensor de flujo de calor (Heat Flux Sensor) es una termopila (Figura 2) en la que las juntas de las termocuplas están dispuestas en serie a ambos lados del material que provee la resistencia térmica, en forma de imagen especular (formando anti-pares). Los terminales de salida son fijados uno a la primera junta superior y otro a la última junta de la superficie inferior. La termopila se inyecta generalmente en plástico, resultando en una placa plana muy delgada, donde el flujo del calor circula en forma perpendicular a la superficie. Por ser dispositivos auto-generadores no requieren suministro externo de corriente.

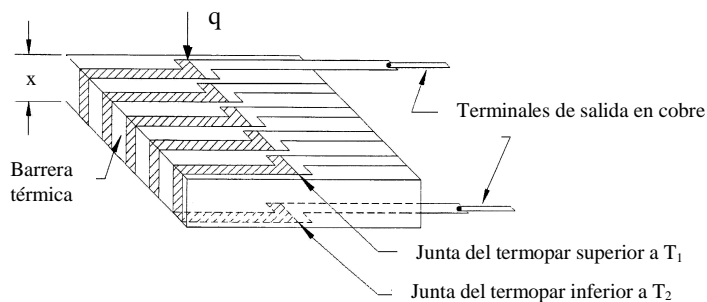


FIGURA 2: Corte de un sensor de flujo de calor

Las ventajas de las termopilas son su estabilidad, su baja resistencia óhmica (lo que implica que es poco afectada por disturbios electromagnéticos), buena relación señal-ruido, y el hecho de que a una entrada cero corresponde una salida cero.

Sus desventajas son la baja sensibilidad y la sensibilidad a flujos térmicos laterales.

La densidad de flujo de calor (q/A) que atraviesa el sensor es función de la conductividad térmica (K) y espesor (x) del sustrato donde está inyectado, y del gradiente térmico.

Por otro lado, el sensor de flujo de calor (HFS) genera una FEM proporcional a la diferencia de temperatura existente entre ambos lados del material; la constante de proporcionalidad se conoce como sensibilidad del sensor. Esto es,

$$\frac{q}{A} = \frac{k}{x} \cdot \Delta T = \frac{V_{SEN}}{E_{SEN}} \quad (2)$$

Donde:

(q/A) :	Densidad de flujo de calor	[W / m ²]
V_{SEN} :	Voltaje de salida	[V]
E_{sen} :	Sensibilidad del sensor	V / (W/m ²)

Este modelo implica asumir presupuestos que, al ser explicitados dejan en descubierto las restricciones del mismo y las posibles fuentes de error que pueden tener lugar al usar estos sensores. Tales supuestos son:

TABLA 1: Supuestos y fuentes de error en la utilización de HFS

Supuesto	Posible error por:
El flujo de calor local absorbido es igual al incidente, y el sensor no introduce perturbación significativa.	Resistencia del material Resistencia de contacto Desviación por el sustrato Desviación por el sensor Convección y radiación
La resistencia y la capacidad térmica del sensor son constantes e iguales a las del material de llenado.	Heterogeneidad del sensor
Flujo de calor es perpendicular a la superficie del sensor	Flujo de calor lateral
El flujo de calor se mide en estado estable.	Respuesta dinámica transitoria
Las propiedades del sensor y la respuesta de la termopila no varían con la temperatura (son estables)	No linealidad con la temperatura
La medición está libre de todo tipo de “ruido”	Ruido térmico Ruido eléctrico

Inicialmente, los sensores de flujo de calor se aplican en la industria aeroespacial y en agronomía, más recientemente se han comenzado a aplicar en investigación de procesos de alimentos, como ser productos de panadería.

2. Objetivos

Estudiar la factibilidad de utilizar sensores de flujo de calor en evaporadores tubulares de productos alimenticios.

Desarrollar los instrumentos necesarios para la aplicación de los sensores a evaporadores tubulares.

Comprobar el funcionamiento de los sensores a escala de laboratorio y planta piloto.

3. Metodología

Mediante análisis teórico se concluye que la mayor fuente de error en este caso es debido a flujo de calor lateral que hace que sólo se pueda disponer de menos del 50% del flujo total de calor y, tal vez, el “ruido eléctrico”.

En base a las especificaciones técnicas de los distintos fabricantes, se decide adquirir sensores RdF modelo 20 453-2, del que se tenían referencias previas, y cuyas características son:

TABLA 2: Características del sensor de flujo de calor

Tipo de sensor	Termocupla	Unidades
Dimensiones: Espesor	1,27	mm.
Largo / Ancho	12,7 / 11,4	
Rango de flujo de calor	283.526	W / m ²
Rango de temperaturas	hasta 260	°C
Resistencia (nominal)	5 (máximo)	Ω
Sensibilidad (nominal)	0,017	μV/(W/m ²)
Rango de señal	4,85	mV
Tiempo de respuesta	0,06	s
Capacitancia térmica	408,28	J / m ² . °C
Resistencia térmica	8,82 .10 ⁻⁴	°C .m ² / W

A fin de reproducir lo mejor posible las condiciones de operación, los sensores se fijan a la parte exterior de un tubo de acero inoxidable del mismo tipo que el empleado en el evaporador. Se hace circular agua fría por su interior y se sumerge en un baño termostático, que opera como fuente de calor

La señal de salida se amplificó con un transmisor 4-20 mA Omega modelo TX802DC y la señal amplificada ingresó a una placa conversora A/D Weiss instalada dentro de una PC (Figura 3).

Para la adquisición de datos se utilizó un software SCADA Taurus configurado especialmente y los datos históricos obtenidos se convirtieron a formato de planilla de cálculo para su tratamiento.

Estos primeros resultados fueron altamente insatisfactorios lo que llevó a un reformulación del sistema experimental.



FIGURA 3: Primer dispositivo experimental

En el segundo dispositivo se cambió el sistema de acondicionamiento de señales, reemplazando el transmisor-conversor de 4-20 mA por un módulo preparado para recibir hasta ocho entradas, que está compuesto de dos partes fundamentales: un dispositivo basado en microprocesador que controla las comunicaciones y la conversión analógica-digital de las señales, y un dispositivo amplificador de ganancia fija. (Ver Figura 4)

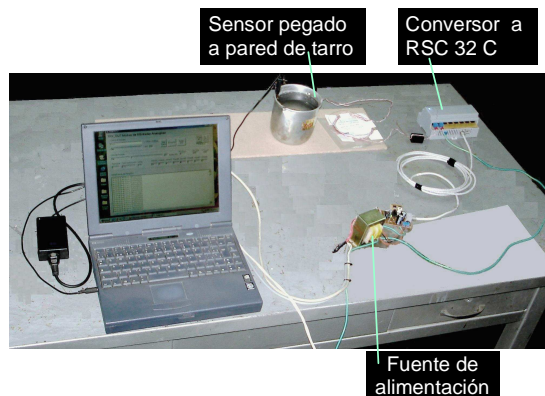


FIGURA 4: Segundo dispositivo experimental

La transmisión de la señal se efectúa utilizando el concepto de red por medio de una variante de la norma RS – 422 sobre cable tipo UTP. De esta forma, las señales enviadas llegan a la PC a través de un único cable que comparte con otros módulos (se llegará a operar con 32 entradas).

En este caso los resultados fueron satisfactorios por lo que el siguiente paso fue realizar una prueba preliminar de todo el sistema de adquisición en el equipo de evaporación, con el empleo de un sensor de flujo de calor unido a la superficie externa del tubo interno. La prueba consistió en hacer circular agua por el tubo interno y vapor en el anulo del intercambiador. Se trabajó modificando la velocidad de circulación del agua por el interior del tubo y la temperatura de vapor en el exterior, de forma de observar la respuesta del sistema de adquisición a los cambios de los valores de flujo de calor. Durante este ensayo se probó la influencia del ruido eléctrico debido a motores de bombas, variadores de

velocidad del evaporador, etc., no observándose perturbación importante del sistema por el empleo de los mismos.

4.- Resultados y discusión:

4.1. Las primeras determinaciones se realizaron sumergiendo bruscamente el dispositivo en agua caliente, y luego retirándolo. Las variaciones en la densidad de flujo de calor para tales situaciones se estimaron del orden de 10^5 W/m², lo que, de acuerdo con la sensibilidad del sensor produce una salida de milésimas de volt (En la Figura 5, se muestran, a modo de ejemplo, dos determinaciones). Los valores de lectura obtenidos, en una escala arbitraria, son absolutamente inútiles, por estar corrompidos con ruido.

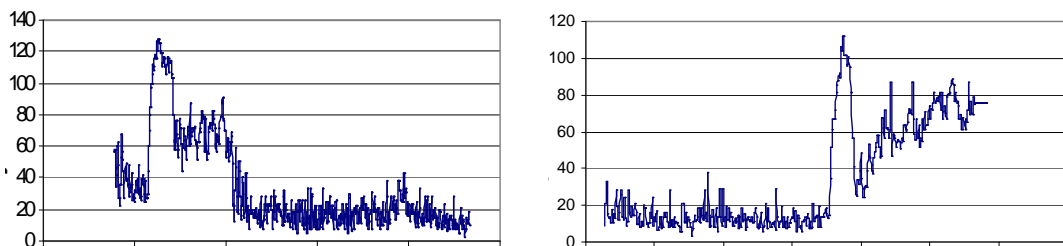


FIGURA 5: Respuesta de HFS ante variaciones de rango máximo

4.2. El segundo dispositivo se construyó para filtrar mejor el ruido eléctrico y a la vez amplificar más la señal. Al repetir la primera experiencia el cambio resultó tan notable que se decidió ensayar en condiciones de trabajo real, esto es instalando los sensores en el tubo del evaporador. La forma de operación fue la siguiente (Figura 6)

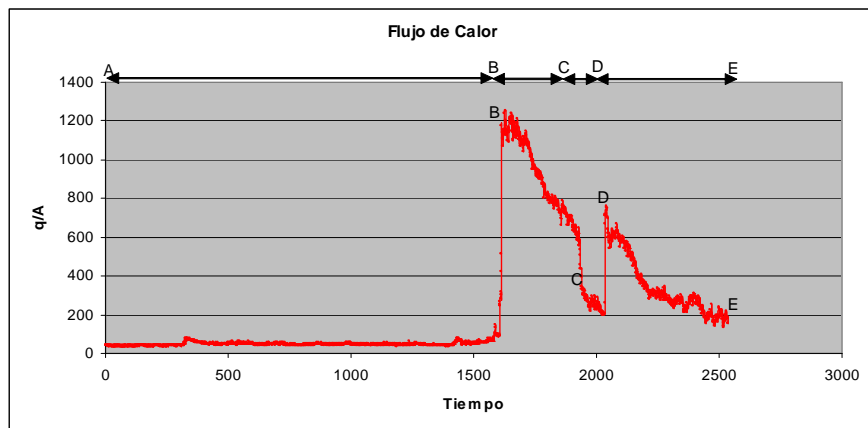


FIGURA 6: Valores de densidad de flujo de calor obtenidos en un tubo de evaporador

El sistema de adquisición fue encendido y dejado en reposo para lograr su estabilización eléctrica (tramo A - B). Por el tubo interno, en tanto, se hacía circular agua pero sin permitir el ingreso de vapor al sistema, con lo que el flujo de calor era prácticamente constante y de muy bajo valor. Luego se abría el paso del vapor y el incremento del flujo de calor quedó

de manifiesto por el primer pico en el gráfico (Punto B). A medida que transcurría el tiempo, el agua del tubo interno, que era recirculada, se calentaba, lo que hacía disminuir el flujo de calor (tramo B – C). Se cerraba entonces la entrada de vapor y la temperatura del lado del vapor disminuía (caída en el tramo C). Entonces el proceso se repetía abriendo nuevamente el paso de vapor (tramo C – D) con el agua del tubo interno un poco mas caliente.

El uso de sensores de flujo de calor para medición en evaporadores tubulares se presentaba inicialmente como poco prometedor debido a distintas causas:

- a) La buena conductividad del metal (acero inoxidable) donde debían colocarse habría de producir error por flujo de calor lateral, ya que sólo se dispondría de una fracción del flujo de calor disponible (algo menos del 50%).
- b) Los bajos valores de señal de salida de los sensores implicaba trabajar con señales muy débiles y requerimientos de grandes amplificaciones.
- c) Los bajos valores de sensibilidad de los sensores hacían que el ruido eléctrico afectara fuertemente las lecturas, si el sistema no era diseñado con cuidados especiales para reducirlo a un mínimo.

5. Conclusiones

- Experimentalmente se han superado los problemas y se logró obtener valores con la suficiente precisión y estabilidad para utilizarlos en aplicaciones de ingeniería de alimentos.
- El uso de sensores de flujo de calor en evaporadores de productos alimentarios ha presentado diversos desafíos que se han resuelto con éxito. Se está trabajando en la calibración de los sensores en el lugar de trabajo, en condiciones reales de operación.
- La aplicación de HFS en evaporadores para alimentos fluidos, abre un nuevo campo para la investigación al poder medir valores puntuales de densidad de flujo de calor en procesos en los que sólo cabía asumir su distribución en base a algún marco teórico.

6. Bibliografía

- Barnes, A. Sensores de flujo de calor. Partes 1 y 2
- Diller, T. (2000) Heat flux. CRC Press. Flda.USA
- Gauthier, R. (1981) Surface temperature measurement. InTech, Feb. 57-60
- Hukseflux: Applications and specifications of heat flux sensors
- Ortolano, D.- Hines, F (1983) A simplified approach to heat flow measurement. Advances in Instrumentation Vol 38, Part 2
- RdF: Heat flux sensors for precise measurement
- Rubio, L.- Muñoz Puentes, E.- Carullo, C.- Chernikoff, R.- Sini, S.- Possa, H.: Sensores de flujo de calor en evaporadores: fuentes de error e instalación. XX Jornadas de Investigación. Universidad Nacional de Cuyo- Septiembre 2006, Mendoza
- Saidi, A.- Kim, J. (2003) Heat flux sensor with minimal impact on boundary conditions. Proceedings of ASME Heat Transfer Conference. Las Vegas, July
- Vatell: Improving accuracy in heat flux measurements
- Vatell: Noise reduction and theoretical noise limits for heat flux measurement