

# **ANEXO B**

## **APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A UN CALORÍMETRO DE CONDUCCIÓN.**

## ÍNDICE DEL ANEXO B

### APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A UN CALORÍMETRO DE CONDUCCIÓN.

<b>B.1. INTRODUCCIÓN.</b>	<b>3</b>
<b>B.2. CARACTERÍSTICAS DEL CALORÍMETRO.</b>	<b>3</b>
<b>B.3. MODELO TÉRMICO Y RESULTADOS.</b>	<b>4</b>
<b>B.4. CONCLUSIONES.</b>	<b>6</b>
<b>B.5. REFERENCIAS.</b>	<b>9</b>

## ANEXO B

### **APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A UN CALORÍMETRO DE CONDUCCIÓN.**

#### **B.1. INTRODUCCIÓN.**

La metodología de análisis térmico para edificios, propuesta en el Capítulo 2, y consistente en un modelo basado en la red eléctrica equivalente, se aplicará a otro sistema térmico muy diferente como es un calorímetro de conducción.

La finalidad es determinar similitudes y diferencias en el planteamiento del modelo y en los resultados obtenidos.

#### **B.2. CARACTERÍSTICAS DEL CALORÍMETRO.**

El calorímetro de conducción que se utilizará para la comparación es de inyección de masa variable, y está descrito en la referencia<sup>1</sup>. Los calorímetros de conducción de inyección continua se usan para efectuar estudios termodinámicos de mezclas de líquidos. La determinación de las propiedades termodinámicas de mezclas y soluciones se realiza mediante la identificación del modelo calorimétrico y un procesamiento de señales apropiado de las medidas experimentales.

El principio de funcionamiento de los calorímetros de inyección y de masa variable, consiste en la inyección continua de un líquido en la celda, que además ya contiene otro líquido. El calor (variación de entalpía) en la mezcla de líquidos está relacionado con la disipación  $W(t)$ , suponiendo que en cada instante se llega al equilibrio y la mezcla es perfectamente homogénea.

Se puede ver un esquema del calorímetro en la Fig. B.1.

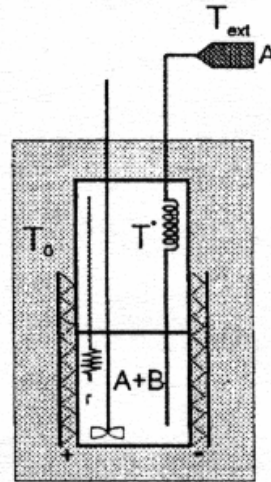


Fig.B.1.: Esquema de un calorímetro de inyección y de masa variable. (Fuente: (1))

$T_0$  temperatura del termostato.

$T_{ext}$  temperatura exterior.

$T^*$  temperatura alcanzada por el líquido antes de entrar en la celda.

$r$  resistencia para la calibración eléctrica.

### B.3. MODELO TÉRMICO Y RESULTADOS.

Para explicar el fenómeno de variabilidad del sistema, los autores de la experimentación eligieron un modelo basado en la analogía RC, de 2 elementos. Una representación del modelo asociado al dispositivo, se puede ver en la Fig.B.2. La disipación se produce en el primer cuerpo,  $C_1$  y  $C_2$  con las capacidades caloríficas del 1er. y 2º elemento,  $P_1$  y  $P_2$  son las inversas de las resistencias térmicas entre los elementos y el termostato,  $P_{12}$  es la inversa de la resistencia térmica entre ambos elementos, y  $T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas de ambos elementos.

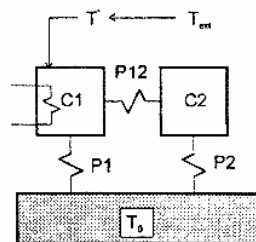


Fig.B.2.: Modelo para un calorímetro de inyección y de masa variable. (Fuente: (1))

El modelo de 2 capacidades caloríficas tiene una función de transferencia T.F. con dos polos (constantes de tiempo) en la situación invariante. A pesar de que el mismo no representa

exactamente la T.F. experimental, es suficiente para obtener una aceptable aproximación del calor de la mezcla en función del tiempo. La representación en frecuencias de la T.F. experimental, obtenida por medio del análisis de la respuesta a un escalón en  $W(t)$ , suministrado en forma eléctrica, y las calculadas con modelos de 2 y 3 polos, se puede ver en la Fig. B.3.

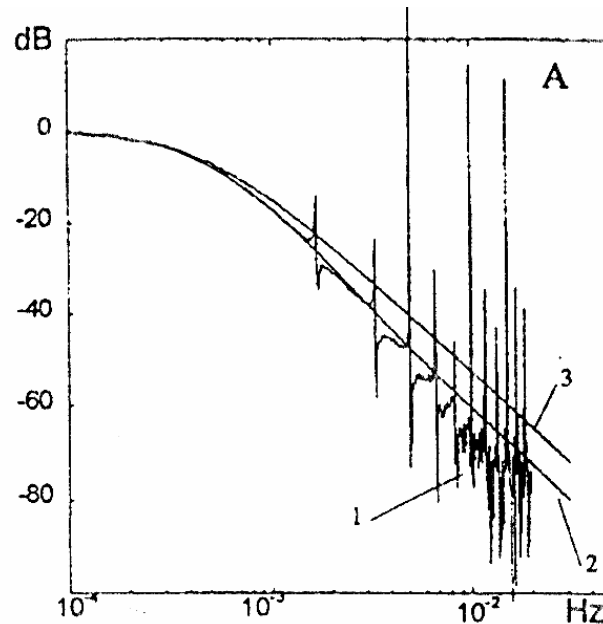


Fig.B.3.: Calorímetro de inyección y masa variable. La curva 1 es la T.F. experimental, la curva 2 corresponde a una T.F. con 3 polos y 1 cero, la curva 3 a una T.F. de 2 polos. Los picos "discontinuos" de la curva T.F. experimental son el resultado de la técnica de obtención de la Función de Transferencia y no de propiedades térmicas del sistema. (Fuente: (1))

La curva experimental se obtuvo a través de la respuesta a una potencia eléctrica aplicada durante 10 minutos (para un contenido de  $20 \text{ cm}^3$  de benceno).

Los valores de las curvas 2 y 3 se obtuvieron a través de un procedimiento numérico de filtrado inverso. A pesar de que la curva 2 (3 polos) se acerca más a la curva experimental que la curva 3 (2 polos), la aproximación se puede considerar aceptable, teniendo en cuenta la simplificación. Específicamente, los valores de los polos hallados para la curva 3 (modelo 2C) son:

$$\tau_1 = 540 \text{ s y } \tau_2 = 210 \text{ s.}$$

Para la obtención de la sensibilidad, incluso se utiliza un modelo de 1 elemento (sólo  $\tau_1$ ), siendo los resultados también bastante satisfactorios.

En el modelo de capacidad calorífica variable propuesto para el edificio, aplicado a un modelo 1R1C, la capacidad calorífica que interviene ( $C$ ), no es constante, sino que es una función  $C(\omega)$  que tiene comportamientos diferentes a tramos, en la aproximación utilizada.

La capacidad varía en función de la frecuencia. Después de pasada una  $\omega$  límite, que depende del material, la función continúa a más baja frecuencia (períodos más prolongados) con un valor constante, que es la  $C$  estática. La frecuencia  $\omega$  y la geometría y propiedades del material, establecen una distancia límite de penetración. Si el grosor de las paredes es inferior a esta distancia, el comportamiento responde a  $C$  constante.

Aplicando parámetros de la metodología propuesta para el edificio al calorímetro, se estima que la profundidad de penetración aproximada del calor en el calorímetro descrito, en base a la primera constante de tiempo hallada por los autores  $\tau_1$  y del material (metálico) de que está constituido el recipiente del calorímetro, es de unos 13 cm. Comparando este valor con el espesor de las paredes de un calorímetro, que puede ser del orden de unos 5 mm, se ve que la capacidad calorífica no alcanza su comportamiento variable, debido a que el calor traspasa rápidamente el material. El modelo adoptado en el calorímetro, en cuanto a una  $C$  constante, es por tanto correcto, así como el diseño del dispositivo para los fines experimentales.

#### **B.4. CONCLUSIONES.**

Comparando las características térmicas de ambos sistemas, sobre los que se ha aplicado un análisis basado en un modelo similar (analogía RC), se pueden extraer algunas conclusiones de los resultados obtenidos.

Como primera comparación, cabe destacar las diferencias entre ambos sistemas en cuanto a las medidas que se puede obtener de ellos para fines experimentales. La relación señal/ruido que se obtiene de un calorímetro es mucho mejor (valores más precisos), que la que se puede obtener en el interior de un edificio, cuya excitación son las condiciones meteorológicas exteriores. (Comparar la Fig. B.3. con cualquiera de las T.F. de los casos estudiados en el Capítulo 3.). Esto implica que cualquier comparación parte en realidad de estas diferencias, que tienen que ver con la significancia de las magnitudes y el ruido intrínseco a las características del sistema y a la excitación que tiene aplicada.

El edificio presenta un comportamiento térmico en el que intervienen muchas variables y fenómenos térmicos. En forma general, tanto efectos de conducción, como de radiación y convección, tienen relevancia. Sus paredes tienen normalmente un grosor considerable, que no permite el paso del calor en forma muy rápida, sino que su constante de tiempo puede ser del orden de días. Esto implica que el paso del calor a través de la envolvente puede ser lo suficientemente lento, como para que los muros se calienten poco a poco, y el ambiente interior se comience a calentar sólo después de que el calor penetró todo el muro. Hasta ese momento, C presenta un comportamiento variable con la frecuencia, que se hace constante para frecuencias en las que la “onda” térmica penetra todo el espesor.

En el caso del calorímetro de conducción, los fenómenos radiantes y convectivos no son tan relevantes frente a los de conducción. La constante de tiempo principal es normalmente del orden de minutos, su espesor es reducido y su conductividad muy alta. Esto implica que la onda térmica traspasa en forma muy rápida el material, sintiéndose los efectos casi inmediatamente en todas partes, y verificándose una buena uniformidad de la temperatura. El comportamiento de la C es por tanto constante bajo estas condiciones, y la geometría y el montaje de las partes es determinante.

En general un sistema térmico se podría describir, desde el punto de vista de su comportamiento, en tres rangos de frecuencia diferentes (concepto ya introducido específicamente para el análisis del comportamiento en edificios en el Capítulo 4):

- A muy bajas frecuencias, para un sistema cuya geometría no sea muy compleja (más bien compacto), podría utilizarse el modelo 1R1C. La geometría, los materiales, el acoplamiento entre elementos (P ó R), decide los valores de RC (ó  $\tau$ ) como constante de tiempo global, y, eventualmente, se pueden requerir otras constantes de tiempo para describir otros elementos, como por ejemplo, la cubierta o tapa del calorímetro, agitador u otros elementos.

El interior del calorímetro presenta relativamente una gran uniformidad en las temperaturas, siendo además un sistema de variables más controladas, es decir que se podría aproximar más a un modelo 1R1C. El sistema se acerca aún más a un modelo de 1 elemento si la mezcla de líquidos en el interior se ha agitado adecuadamente y es bastante homogénea.

- A frecuencias medias, se observa una “lentitud” en la penetración del calor por la envolvente hacia el interior del sistema, en sistemas térmicos de geometría “sencilla”. Este caso se da con relativa frecuencia en edificios, entre otros motivos, por las

características de los materiales de la envolvente y por las frecuencias de la excitación exterior. La introducción de la función  $C(\omega)$  permite una aproximación, dentro de sus limitaciones (una sola temperatura interior, cerramientos con diferencias de temperatura), al comportamiento térmico dentro de este rango, sin introducir más constantes de tiempo ni más variables.

Para mantener la simplicidad de un modelo de pocos elementos, la función  $C$  variable con la frecuencia ayuda a ajustar algún tipo de efectos térmicos que no obedecen a la idealización del edificio como 1 solo elemento. Cabe destacar, que en los casos de edificios analizados, la forma de variación de  $C$  en función de la frecuencia, una vez fijada no es ajustable.

- A frecuencias altas, el efecto de la no-homogeneidad de la temperatura se hace evidente, el sistema debe aproximarse por elementos finitos a otras soluciones, lo que implica la utilización en el modelo de varios valores de  $RC$  o varias  $\tau$ . Esto ocurre por ejemplo con calorímetros de estructura más compleja<sup>2</sup>.

Los efectos de estratificación y en general la distribución no uniforme de las temperaturas interiores al edificio, hace que sea más impreciso un modelo tendente a pocos elementos.

El modelo de constantes de tiempo localizadas describiría en el calorímetro, el equivalente a los efectos de distribución espacial en las temperaturas interiores de un edificio, a otra escala geométrica diferente.

En general, al plantear un modelo térmico de “elementos finitos” la constitución físico-geométrica y los materiales son determinantes para decidir qué tipo de elementos pueden ser representativos del comportamiento, y cómo están acoplados entre sí, para constituir el “circuito” térmico. El número de resistencias y capacitores, así como las posibles combinaciones en serie y paralelo entre ellos, representarían en el edificio los posibles comportamientos que adoptan elementos tales como la envolvente, las ventanas, las masas interiores e incluso las capas convectivas superficiales de los materiales, funcionando conjuntamente. (Algunos ejemplos de las numerosas “redes eléctricas equivalentes” utilizadas como modelo térmico en edificios, se mencionan en el Capítulo 1.). De la elección de la configuración del “circuito” eléctrico, dependerá el comportamiento frecuencial del modelo, y en definitiva, en qué medida se acerca éste al comportamiento real del sistema térmico.

Un calorímetro y un edificio son, en gran medida, sistemas de comportamiento térmico extremo, a los que, teniendo en cuenta el tipo de fenómenos que tienen lugar en cada uno, se les puede aplicar un modelo similar, cuya simplificación o mayor detalle en las variables intervinientes, dependerá de las características particulares de cada sistema.



El criterio a adoptar para la discretización de un sistema térmico (que establece el tipo de modelo) en cuanto al material o al espacio, por motivos de conducción térmica, depende en gran medida del rango de frecuencias que se considere relevante analizar.

En cuanto a los edificios, existen además otras causas de discretización, que obedecen a otro tipo de fenómenos térmicos. Véase la estratificación de las temperaturas interiores o la distribución no uniforme de temperaturas desde el exterior hacia el interior.

## **B.5. REFERENCIAS.**

<sup>1</sup> Socorro, F.; Rodríguez de Rivera, M. *Micro-Effects on Continuous-Injection Heat Conduction Calorimetry*. Journal of Thermal Analysis, Vol. 52, 1998, pp. 729-737.

<sup>2</sup> Isalgué, A.; Ortin, J.; Torra, V.; Viñals, J. *Heat Flux Calorimeters: Dynamical Model by Localized Time Constants*. Anales de Física. Vol. 76, 1980, pp. 192- 196.