

Condiciones térmicas de un dispositivo electrónico en caso de incendio.

Segunda parte: simulación numérica

Primera parte publicado en la Revista Tecnología en Marcha 20-4, Octubre-Diciembre 2007

Fecha de recepción: 04/05/2007

Fecha de aceptación: 20/09/2007

Bruno Chinè¹

Palabras clave

Transferencia de calor, materiales, simulación numérica.

Key words

Heat transfer, materials, numerical simulation.

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de una simulación numérica llevada a cabo para analizar las condiciones térmicas a la cual un sistema electrónico, usado para radiocomunicaciones en túneles, podría estar sujeto en caso de incendio. El sistema se compone de un dispositivo electrónico contenido en una caja metálica de acero inoxidable 316, un cable coaxial interno y un cable coaxial externo de cobre. Sobre el sistema que se alberga en una cámara de polímero concreto con una ventana en mica, había sido realizada una prueba al fuego con registro experimental de los valores de temperatura en diferentes puntos del sistema. El trabajo

de simulación numérica se desarrolla usando el software comercial Comsol Multiphysics. El propósito es estudiar los dos mecanismos de transferencia de calor que controlan la temperatura del dispositivo, en particular la conducción térmica a través de la pared de polímero concreto y la ventana en mica, más la transmisión de calor a lo largo del cable coaxial externo. Los resultados numéricos confirman los perfiles de temperatura de la prueba experimental y permiten analizar el comportamiento de los materiales bajo otras condiciones térmicas.

Abstract

In this work we report the results of a numerical simulation carried out to analyze the thermal conditions of an electronic device in case of a fire. The device, which is used for tunnel radio communications, has electronic components and some connections for internal and external copper cables, all contained inside a 316 stainless steel box. The system, which during work operations is protected by a polymer concrete wall with a window

bchine@itcr.ac.cr

of mica, had been analyzed by means of a fire test. During the experimental test, temperature values in different point of the system had been recorded. The numerical simulation work is made with the Comsol Multiphysics commercial code. The aim is to study the heat transfer mechanisms which control the electronic device temperature. These mechanisms are the heat conduction through the polymer concrete wall and the window of mica, together the heat transfer along the coaxial cable. The numerical results confirm the experimental temperature profiles allowing for an effective study of the materials behavior upon other thermal conditions.

Introducción

El los últimos años, los experimentos de laboratorio se unen a la tecnología computacional para estudiar problemas de transferencia de calor bajo condiciones muy extremas. Los cálculos efectuados con modelos computacionales en conjunto con los experimentos de laboratorio que simulan las condiciones reales de uso, pueden predecir con suficiente exactitud, entre otras cosas, los perfiles de temperatura

en los materiales y la probabilidad de que haya un inicio de combustión.

Chiné (2007) realiza un estudio experimental para analizar los valores de temperatura de un dispositivo electrónico, usado para radiocomunicaciones en túneles, en caso de que ocurra un incendio en la proximidad de este. Con el propósito de completar el análisis de los mecanismos de transferencia de calor que se presentaron en ese ensayo, se desarrolla un trabajo de simulación numérica el cual representa el objeto del presente artículo. Descripción del dispositivo electrónico y otros aspectos pueden ser encontrados en el mismo trabajo de Chiné (2007).

En figura 1 se brinda un esquema del sistema en estudio, la ubicación de los elementos y puntos principales de este y la dirección del fuego. Se describen, además, las propiedades principales de los componentes considerados en los cálculos de la simulación numérica.

Pared de polímero concreto

La pared de polímero concreto es parte de un cubo de lado igual a 660 mm, de tal manera que el ancho y el alto de la pared misma son de 660 mm cada uno.

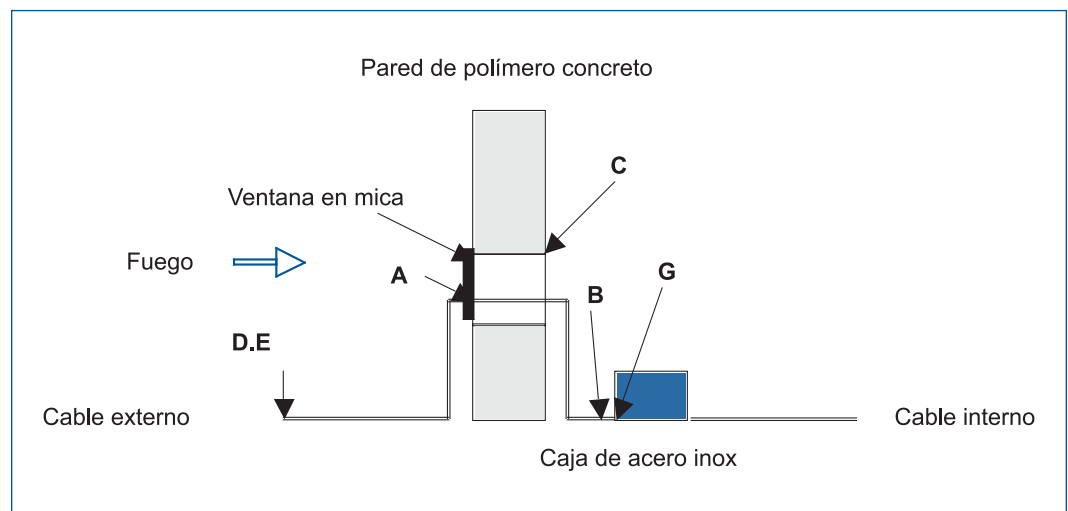


Figura 1. Componentes principales del sistema en estudio y ubicación de los puntos de medición de temperatura (A, B, etc.) del trabajo de Chiné (2007).

El espesor de la pared es de 50.8 mm. La conductividad térmica del material polímero concreto se puede considerar en el rango de 0.16-0.33 W/(m K), siendo en casos mas severos igual a la del concreto, es decir aproximadamente 1.5 W/(m K) (Incropera y DeWitt, 1999). Los valores de conductividad dependen de la temperatura del material y para este material si la temperatura aumenta la conductividad térmica disminuye.

Ventana en material mica

La ventana es de material mica resistente a altas temperaturas. Las dimensiones de la ventana son 320.04 mm de largo y 190.5 mm de alto, con un espesor 6.35 mm. En este caso, la conductividad térmica del material es relativamente pequeña, y es igual a 0.04 W/(m K). En casos más extremos, se puede considerar una conductividad térmica de 0.5 W/(m K) (Incropera y DeWitt, 1999).

Cable coaxial externo

Cable de cobre de diámetro igual a 4.25 mm recubierto por un primer revestimiento de mica de espesor igual a 0.58 mm y un segundo revestimiento de fibra de vidrio de espesor 0.38 mm. Los valores de conductividad térmica que se consideran para estos materiales son respectivamente de 400 W/(m K) para el cobre, de 0.5 W/(m K) para la mica y de 0.04 W/(m K) para la fibra de vidrio (Incropera y DeWitt, 1999).

Punto A): superficie externa de la ventana de mica, directamente investida por la flama.

Punto B): terminal externo del cable coaxial externo (extremidad posterior del cable) localizado en la sección anterior de la caja metálica, con una distancia de la superficie interna de la pared de polímero concreto igual a 150 mm (prueba 1 y 2) y 50 mm (prueba 3).

Punto C): superficie interna de la pared de polímero concreto, en correspondencia del borde superior de la ventana.

Punto D): extremidad anterior del cable coaxial externo, localizado aproximadamente a 400 mm del punto de salida en la ventana de mica y ubicado sobre el revestimiento externo del cable.

Punto E): extremidad anterior del cable coaxial externo, aproximadamente a 400 mm del punto de salida en la ventana de mica y ubicado en la sección metálica de cobre.

Punto G): en el borde inferior de la pared anterior de la caja metálica, aproximadamente a 50 mm (prueba 3) de la superficie interna de la pared interna de polímero concreto.

Modelo utilizado

El estudio numérico de la transferencia de calor, con el cual se pretende completar el análisis de las condiciones térmicas del dispositivo electrónico en caso de incendio, tiene como objetivo principal predecir el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones térmicas. Para aplicar un modelo numérico real de este sistema se simularán primero, las condiciones del experimento de laboratorio de Chiné (2007). Ajustado así el modelo, se simularán sucesivamente otras condiciones de funcionamiento.

De acuerdo con los datos y a la observación experimental, los mecanismos que controlan de transferencia de calor de la región con un incendio hacia el dispositivo electrónico, se pueden clasificar en:

- a) conducción del calor a través de la pared de polímero concreto y la ventana de mica;
- b) radiación del calor desde la superficie interna de la pared de polímero concreto y mica;
- c) conducción del calor a través del cable coaxial externo.

Los fenómenos de transporte de calor convectivo hacia el dispositivo electrónico

pueden ser despreciados. Los mecanismos a) y b) se consideran para calcular las temperaturas en correspondencia de la superficie interna de la pared de polímero concreto y de la ventana de mica. Con estos valores se pueden estimar las temperaturas del dispositivo electrónico por efecto de la radiación térmica. El mecanismo c), en cambio, es para calcular las temperaturas del terminal externo del cable coaxial de cobre, montado en la caja de acero inoxidable, como resultado de la pura conducción de calor en el cable.

La modelación del problema de conducción de calor hacia el dispositivo electrónico se realiza usando el software comercial Comsol Multiphysics (Comsol, 2006) que resuelve las ecuaciones diferenciales de transferencia de calor con el método de los elementos finitos. Mediante esta técnica se resuelve la bien conocida ecuación de difusión del calor no estacionaria que, en el caso de usar coordenadas cartesianas rectangular x, y, z , es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

donde k es la conductividad térmica del material, \dot{q} el calor generado por unidad de volumen, ρ la densidad del material, c_p el calor específico a presión constante del material, T la temperatura y t el tiempo. Las estimaciones de transferencia de calor radiactiva, en cambio, se llevan a cabo usando consideraciones más generales. Las hipótesis consideradas en las simulaciones son las siguientes:

Conducción de calor a través la pared de polímero concreto y la ventana de mica

- 1) La superficie externa de la pared se encuentra a una temperatura uniforme y estacionaria en el tiempo;
- 2) no hay pérdida de calor a través de las superficies laterales de la pared, tampoco a través de las superficies

inferior y superior; es decir, se supone que todo el calor entrante por la superficie externa se conduce hacia la superficie interna de la pared;

- 3) las propiedades de los materiales son uniformes;
- 4) la superficie interna de la pared intercambia calor por radiación con los alrededores.

El problema de la transferencia de calor a través de la pared frontal de polímero concreto y de la ventana de mica se puede representar como un problema bidimensional estacionario y sin generación de calor. Esto equivale a analizar la conducción de calor a través de una superficie compuesta de mica y polímero concreto, como se muestra en figura 2, expuesta a una temperatura T_{ext} en la cara externa. En la cara interior se considera transferencia por radiación con un coeficiente de transferencia de calor por radiación igual a hr y alrededores que presentan una temperatura T_{atr} . De acuerdo con los datos recopilados para los valores de conductividad térmica de los materiales polímero concreto y mica de alta temperatura, estos se consideran, respectivamente, iguales a 0.33 W/(m K) y 0.042 W/(m K). Las dimensiones geométricas de pared y ventana se reportan en figura 2. Sucesivamente, la superficie de cálculo se divide en celdas triangulares, como muestra la figura 3, y se aplica el método de solución de los elementos finitos.

Conducción de calor a través del cable coaxial externo

- 1) Una extremidad del cable se mantiene a una temperatura T_{ext} que representa la temperatura de incendio, constante en el tiempo;
- 2) las pérdidas de calor resultantes a través de la superficie externa del cable se modelan como transferencia de calor convectiva con coeficiente hc hacia los alrededores con temperatura T_{atr} ;

- 3) las propiedades de los materiales son uniformes y el problema se considera estacionario; es decir, se considera que se alcanzan condiciones de equilibrio térmico en el cable;
- 4) existe simetría cilíndrica en el cable coaxial, y se puede representar como un sólido compuesto de tres cilindros superpuestos, el más interno de cobre, el segundo de mica y el externo de fibra de vidrio.

La ecuación 1 se expresa en coordenadas cilíndricas r, θ, z y con las hipótesis anteriores se transforma en la ecuación siguiente:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

donde el problema se puede considerar bidimensional en las coordenadas r y z . De acuerdo con los datos recopilados para los valores de conductividad térmica de estos materiales, se considera una conductividad térmica de 400 W/(m K) para el cobre,

de 0.5 W/(m K) para el revestimiento de mica y de 0.04 W/(m K) para la fibra de vidrio. Se asume una longitud global del cable igual a 45 cm, mientras las restantes dimensiones geométricas han sido brindadas en párrafo 1. En la figura 4 se brinda la superficie de cálculo del cable coaxial por el método de los elementos finitos.

Resultados numéricos

En esta sección se brindan los resultados numéricos de las simulaciones efectuadas.

Conducción de calor a través la pared de polímero concreto y ventana de mica

Primero se simulan las condiciones térmicas aplicadas en el experimento de laboratorio. En este caso se considera una temperatura T_{ext} de 371 °C uniforme en la cara externa de la pared de polímero concreto y en la ventana de mica. Los alrededores que interesan la cara interna de la pared se consideran con una temperatura media T_{alr} de 100 °C, debido al

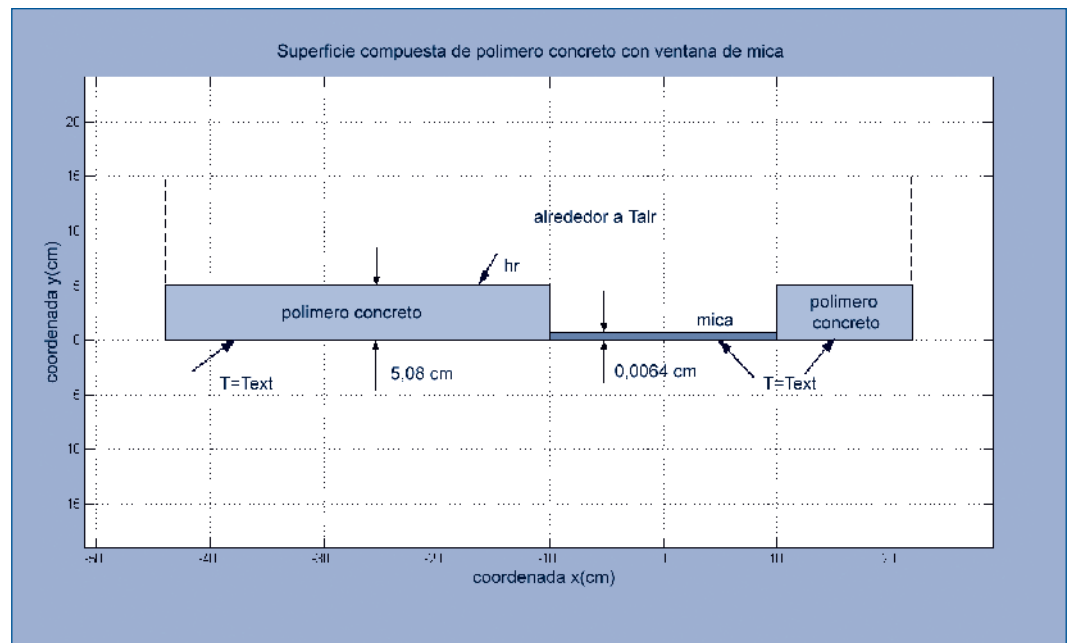


Figura 2. Superficie compuesta modelada.

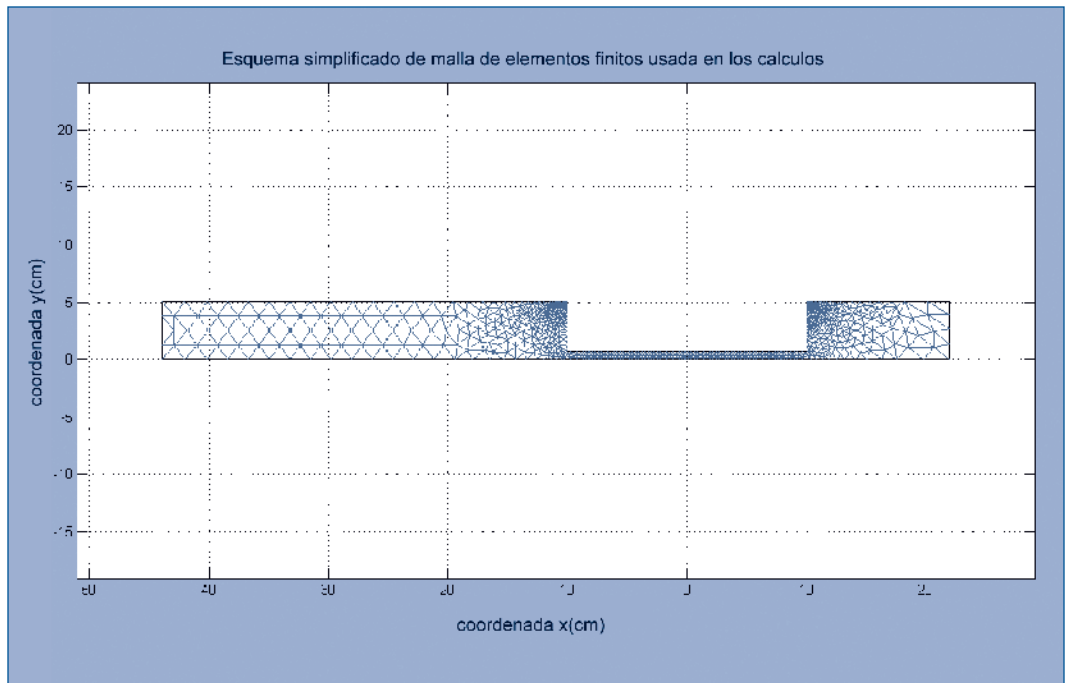


Figura 3. Malla de elementos finitos para la pared de polímero concreto y ventana de mica.

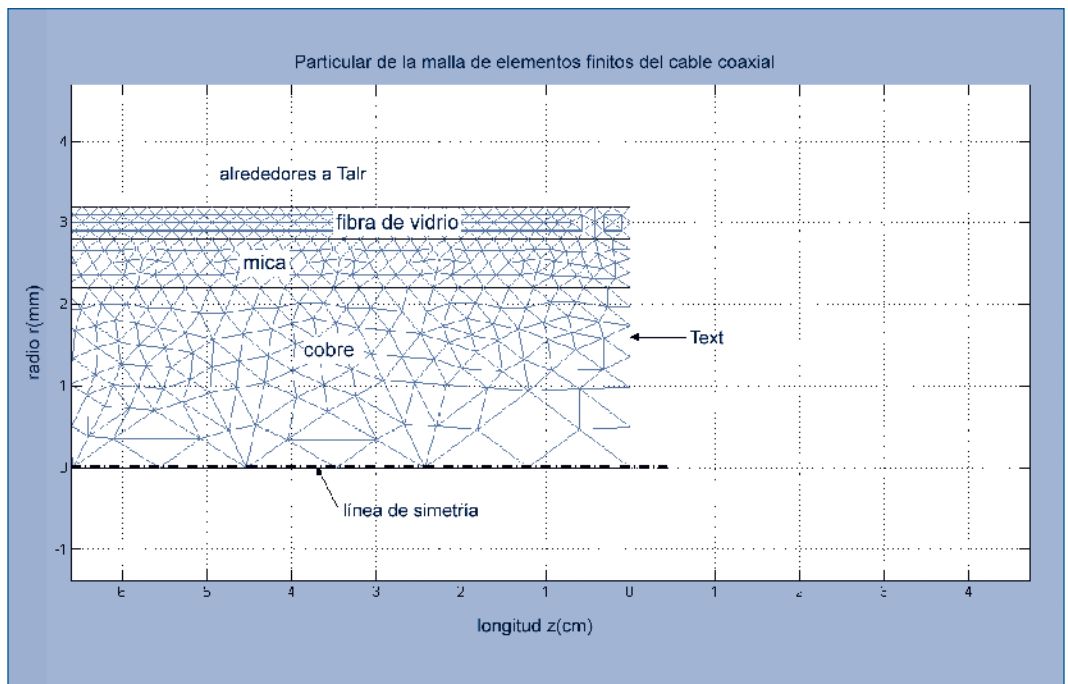


Figura 4. Malla de elementos finitos del cable coaxial.

calentamiento observado en el desarrollo del trabajo experimental. Se considera, además, un coeficiente de transferencia de calor por radiación hr equivalente a $3 \text{ W / (m}^2 \text{ K)}$. La figura 5 muestra la distribución de temperaturas en la superficie estudiada. La figura 6 detalla los valores en la zona de la cara interna de la pared de polímero concreto y de la ventana de mica, que se encuentran más cercanos al dispositivo electrónico.

Sucesivamente, se simulan condiciones térmicas más extremas, pues durante el experimento de laboratorio (Chiné, 2007) se había observado que un aumento del flujo de calor en la cara externa de la pared de polímero concreto origina un aumento de temperatura en todo el sistema en estudio. Con el propósito de calcular el campo de temperatura resultante de un probable incendio que presente valores de temperatura más altos de los experimentados en laboratorio, se realiza, entonces, esta segunda simulación numérica. Para este caso se considera una temperatura T_{ext} de $500 \text{ }^\circ\text{C}$ uniforme en

la cara externa de la pared de polímero concreto y en la ventana de mica; es decir, casi un 33% más grande del caso anterior. Los alrededores que interesan la cara interna de la pared se consideran con una temperatura media T_{alr} de $130 \text{ }^\circ\text{C}$ y se asume un coeficiente de transferencia de calor por radiación equivalente a $3 \text{ W / (m}^2 \text{ K)}$. La figura 7 muestra la distribución de temperaturas en la superficie estudiada. La figura 8 detalla los valores en la zona de la cara interna de la pared de polímero concreto y de la ventana de mica que se encuentran más cercanos al dispositivo electrónico.

Conducción de calor a través del cable coaxial externo

El cálculo de la distribución de temperaturas en el cable coaxial externo es sumamente importante para establecer la distancia hasta la cual la conducción del calor ocasionada por un incendio puede mantener valores peligrosos para el funcionamiento del dispositivo. Recordamos que durante el experimento de laboratorio se midieron (Chiné, 2007) valores de temperatura en correspondencia del terminal externo del cable coaxial (*punto B*), posicionado a una distancia de 15 cm (Prueba 1 y 2) y 5 cm (Prueba 3) de la pared de polímero concreto. Además, se registraron los valores de temperatura en correspondencia de la otra extremidad del cable posicionada a 40 cm (*puntos D y E*) de la región con incendio. Se simulan antes las condiciones del experimento de laboratorio y, sucesivamente, un caso más extremo.

Con el propósito de simular las condiciones experimentadas durante las pruebas 1 y 2 de laboratorio se asume que la temperatura T_{ext} es de $371 \text{ }^\circ\text{C}$, y es esta, aproximadamente, la temperatura del cable en correspondencia a la sección de salida en la ventana de mica. La temperatura media de los alrededores se considera de 50°C con un coeficiente de transferencia convectiva medio de $3 \text{ W / (m}^2 \text{ K)}$. El *punto B*, del

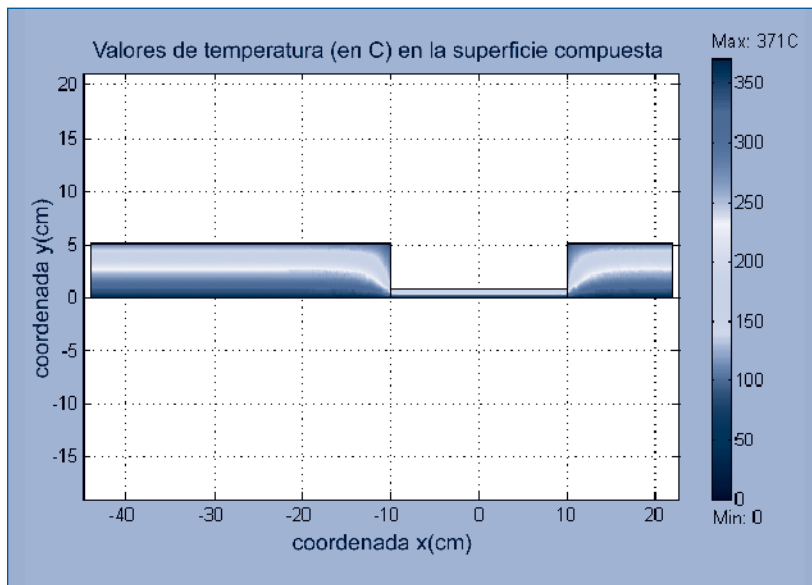


Figura 5. Distribución de temperatura en la pared de polímero concreto y ventana de mica ($T_{\text{ext}}=371^\circ\text{C}$).

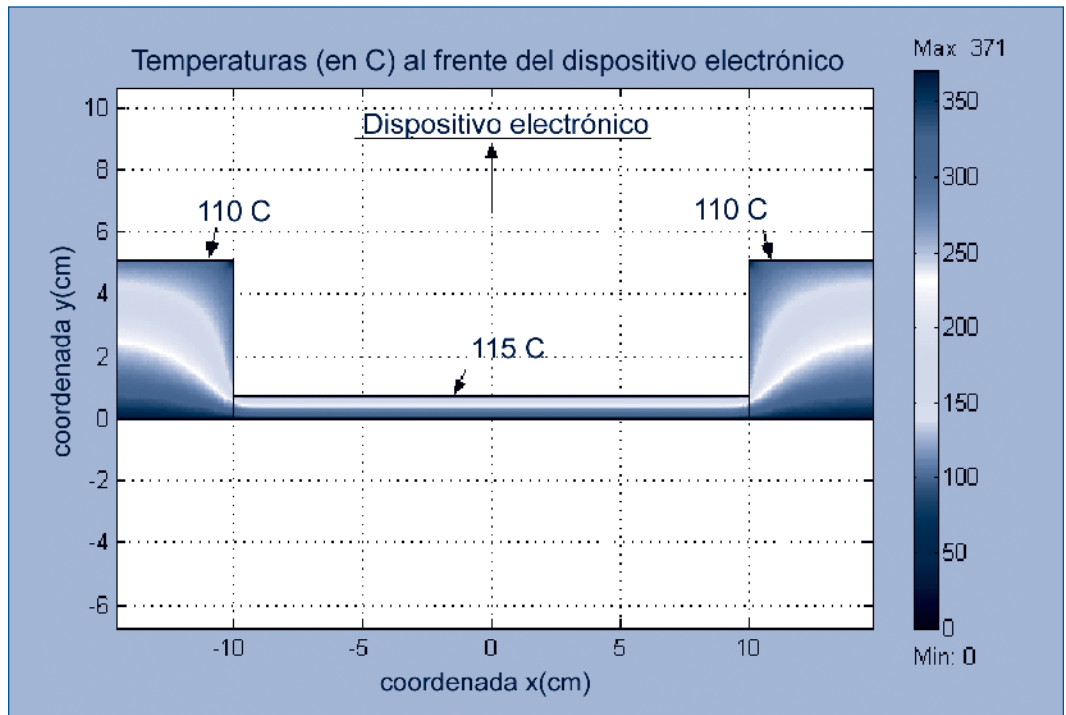


Figura 6. Valores de temperatura justo al frente del dispositivo electrónico ($T_{ext}=371^{\circ}\text{C}$).

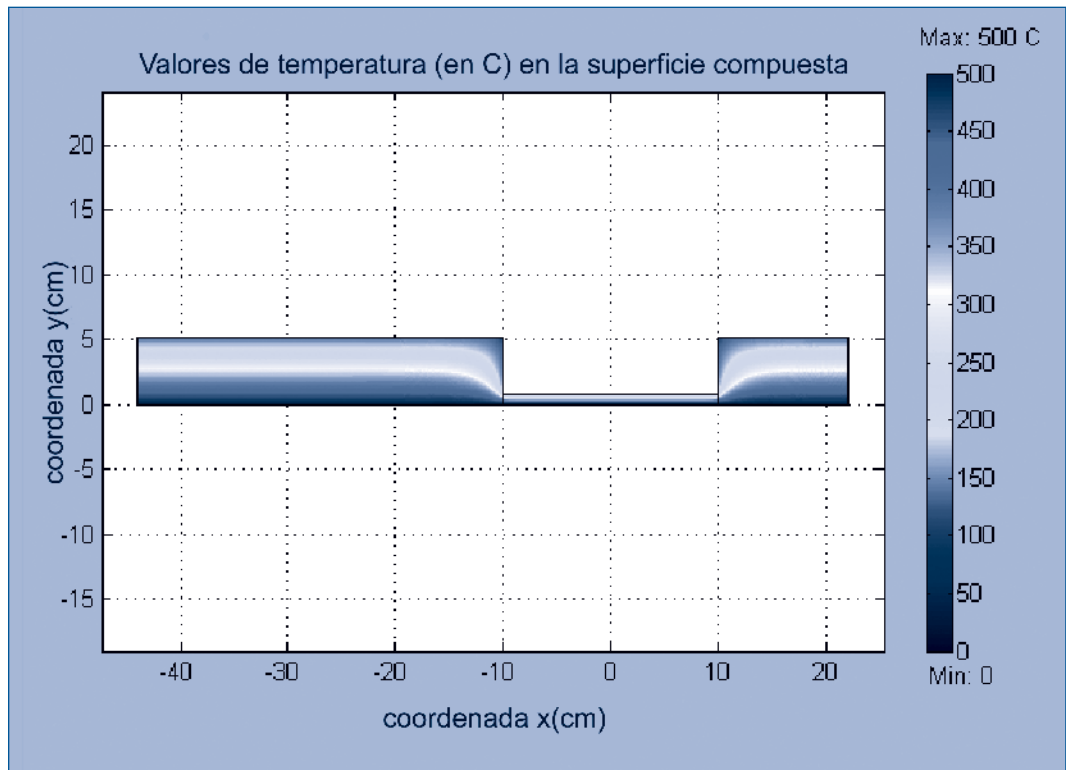


Figura 7. Distribución de temperatura en la pared de polímero concreto y ventana de mica ($T_{ext}=500^{\circ}\text{C}$).

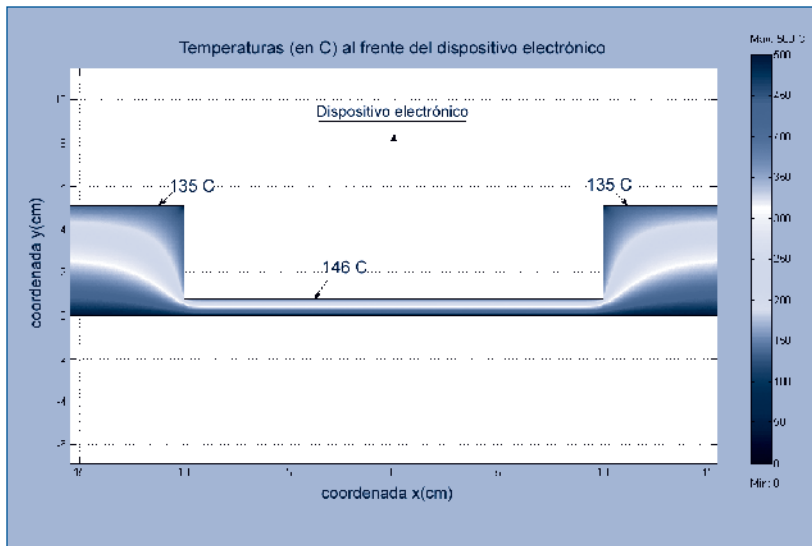


Figura 8. Valores de temperatura justo al frente del dispositivo electrónico ($T_{ext}=500^{\circ}\text{C}$).

cual se dispone de valores experimentales de temperatura, se ubica a 20 mm de la posición donde $T = T_{ext}$. En las figuras 9 y 10 se presentan respectivamente los valores de temperatura en los primeros 20 cm y en los últimos 25 cm del cable coaxial de longitud igual a 45 cm. El valor de la temperatura en una sección distante 20 cm del punto de aplicación del calor es, respectivamente, de 55 °C en la superficie externa sujeta a enfriamiento por convección y aproximadamente de 95°C en la sección metálica de cobre. El valor de la temperatura en una sección distante 40 cm del punto de aplicación del calor es, respectivamente, de 43°C en la superficie externa sujeta a enfriamiento por convección y de aproximadamente 46°C en la sección metálica de cobre. Se observa, además, que para valores de longitud mayores a aproximadamente 35 cm, la temperatura del cable de cobre es inferior a los 60°C.

Posteriormente, se simulan condiciones experimentales más severas, y se asume una temperatura T_{ext} de 500 °C (es decir un 33% más del caso anterior) como temperatura del cable en correspondencia

de la sección de salida en la ventana de mica. El *punto B* se encuentra ahora a 10 cm desde la posición donde $T = T_{ext}$. Para representar las condiciones térmicas existentes en el interior de la cubo de polímero concreto se considera que la temperatura media de los alrededores es de 100 °C, de acuerdo con los valores determinados en el trabajo experimental, mientras el coeficiente de transferencia de calor convectiva medio se mantiene en 3 W/(m² K). En las figuras 11 y 12 se presentan respectivamente los valores de temperatura en los primeros 20 cm y en los últimos 25 cm del cable coaxial. El valor de la temperatura en una sección distante 10 cm del punto de aplicación del calor es respectivamente de 125 °C en la superficie externa sujeta a enfriamiento por convección y de aproximadamente 248°C en la sección metálica de cobre. El valor de la temperatura en una sección distante 45 cm del punto de aplicación del calor es, respectivamente de 102°C en la superficie externa sujeta a enfriamiento por convección y de, aproximadamente, 105°C en la sección metálica de cobre.

Análisis de resultados y conclusiones

Conducción de calor a través la pared de polímero concreto y la ventana de mica

Relativamente a las simulaciones que interesan la conducción de calor a través de la pared de polímero concreto y la ventana en mica, de acuerdo con los valores de las figuras 5 y 6, se puede concluir que existe concordancia entre las simulaciones numéricas y el experimento realizado en laboratorio. En efecto, en la esquina superior de la pared de polímero concreto (*punto C*), después de aproximadamente 1 hora de calentamiento, que podríamos considerar el equivalente de condiciones estacionarias, se había registrado una temperatura de 112 °C. Este valor es prácticamente coincidente

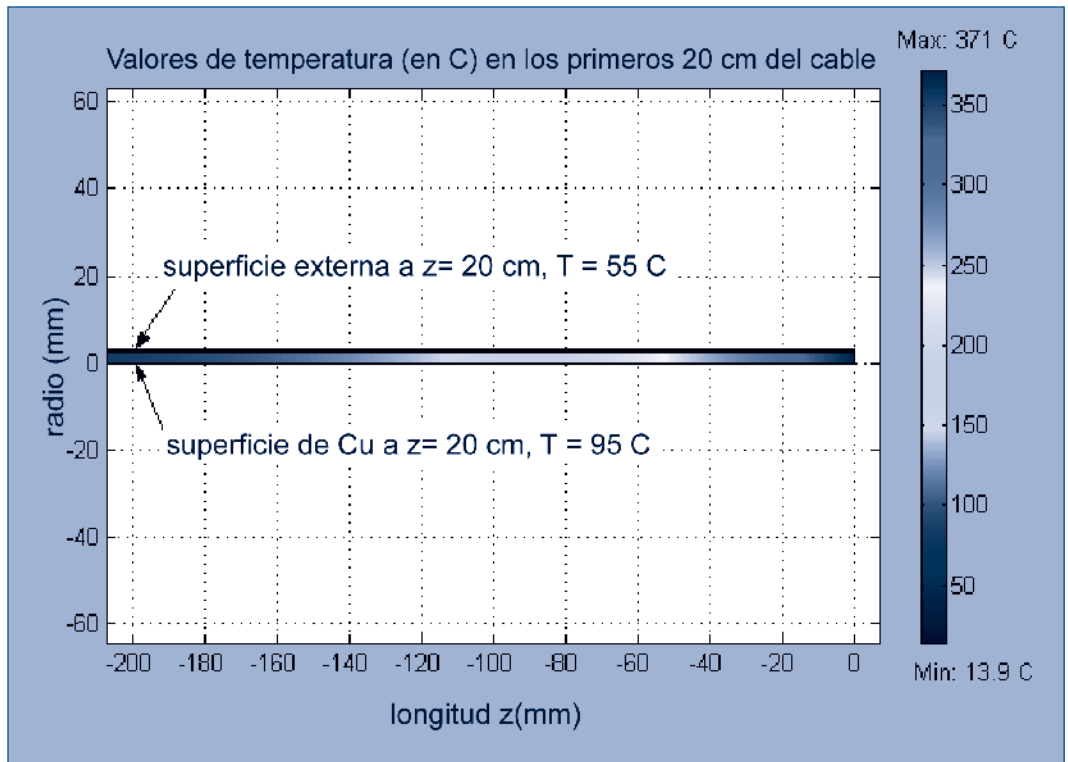


Figura 9. Distribución de temperatura en los primeros 20 cm de cable ($T_{ext}=371$ °C).

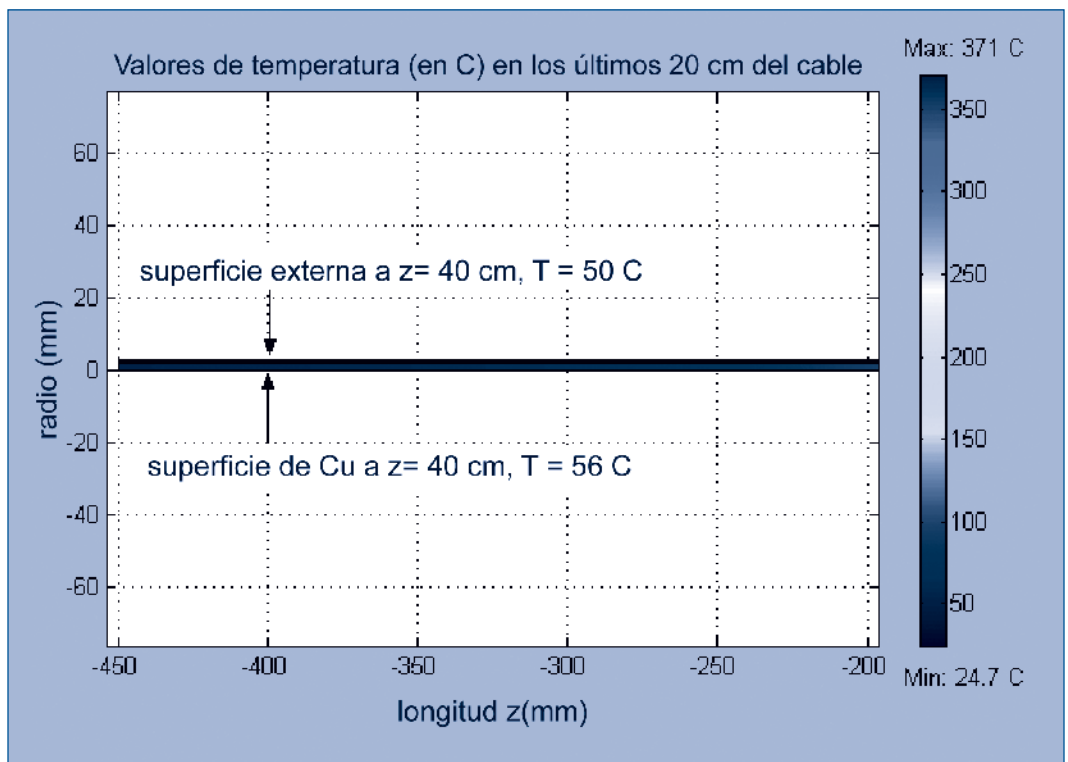


Figura 10. Distribución de temperatura en los últimos 25 cm de cable ($T_{ext}=371$ °C).

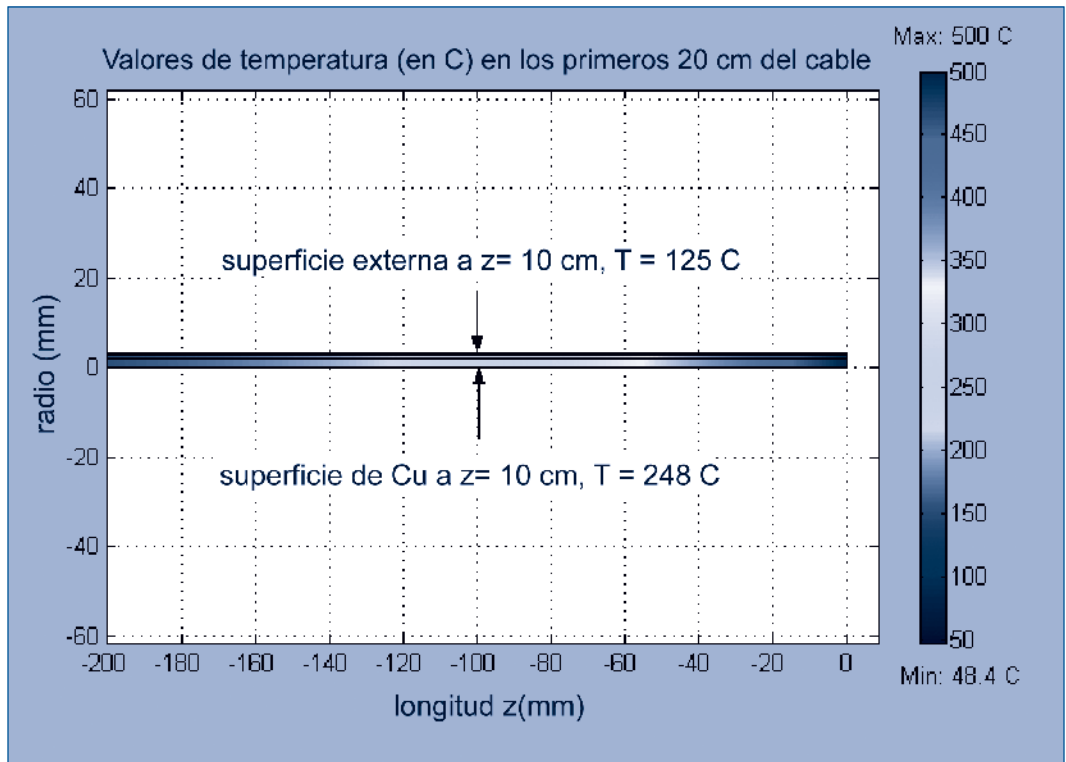


Figura 11. Distribución de temperatura en los primeros 20 cm de cable ($T_{ext}=500^{\circ}\text{C}$).

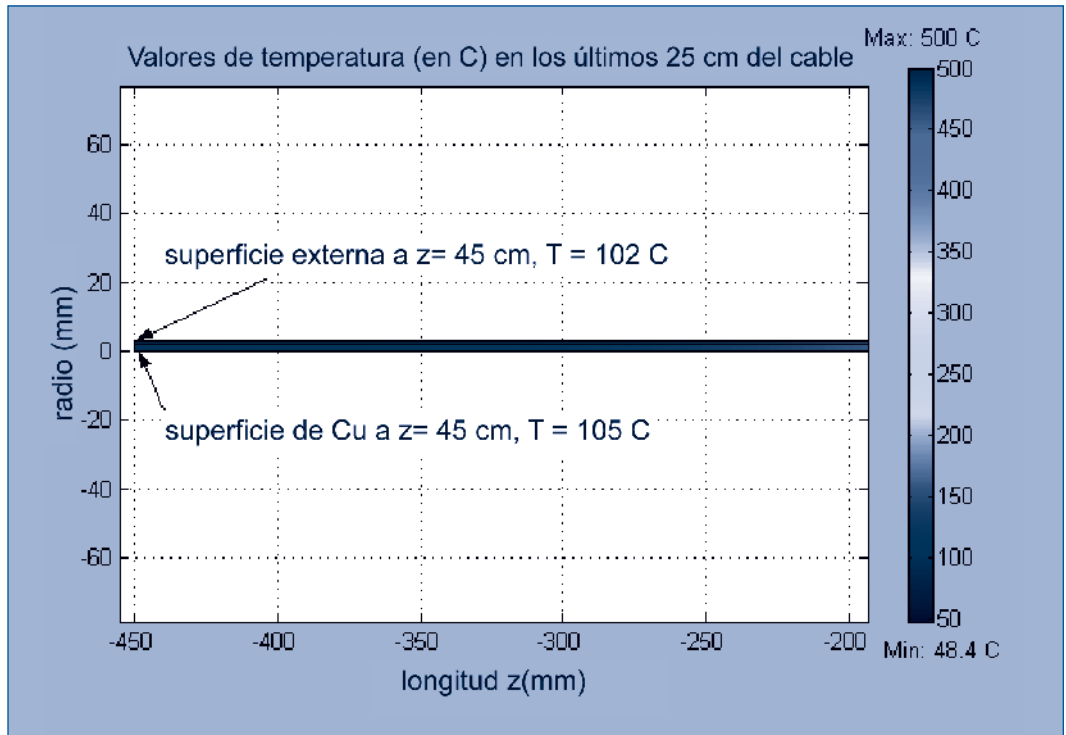


Figura 12. Distribución de temperatura en los últimos 25 cm de cable ($T_{ext}=500^{\circ}\text{C}$).

con el valor de 110 °C (véase figura 6) brindado por la simulación numérica. De esta manera, la temperatura máxima de equilibrio que alcanzaría el dispositivo electrónico posicionado al frente de la pared es justamente de 110 °C, considerando que el calor por radiación se dirige solo al dispositivo. Durante el experimento se había observado, después de aproximadamente 1 hora, que la temperatura del terminal externo de cobre del dispositivo era de 65°C. La diferencia se debe a que el calor no se dirige solo al dispositivo y que existen pérdidas de calor desde las otras paredes del cubo.

Elevando la temperatura de la fuente térmica de 371° a 500°C, se observa que la temperatura en la región posterior que se encuentra al frente del dispositivo electrónico (*punto C*) es de 135°C (figura 8), que se compara muy bien con el valor de 133°C registrado por el termómetro a infrarrojo durante la prueba experimental 3. En este caso la temperatura máxima de equilibrio que tendría la superficie de acero inoxidable del dispositivo es justamente de 135°C, considerando que el calor se dirige solo hacia esta. Durante el trabajo experimental se había observado que la temperatura del terminal externo del cable coaxial de cobre del dispositivo electrónico era de 122°C. En efecto, la proximidad de este elemento a la superficie radiante compuesta de polímero concreto y mica, distante solamente 5 cm, hace que se alcance más fácilmente el valor límite.

Conducción de calor a través del cable coaxial externo

También, en el caso de la conducción térmica a lo largo del cable coaxial externo se observa una relativa concordancia en los resultados numéricos y experimentales. En correspondencia de la sección metálica de cobre a 20 cm desde la aplicación de la fuente de calor, el valor de temperatura de 95°C calculado con la simulación numérica es mayor al de 65°C medido por el termómetro a infrarrojo. En este

caso, la diferencia puede ser explicada con el hecho de que el valor numérico se refiere a una sección interna no sujeta a transferencia de calor con el exterior, mientras que la medición experimental ha sido realizada en una superficie de cobre expuesta. De hecho la temperatura calculada en la superficie externa del revestimiento es de 55°C. Los valores de 50 y 56°C de la figura 9 calculados en correspondencia de una sección distante 40 cm desde el punto de aplicación del calor, prácticamente coinciden con el valor experimental de 60°C medido durante el experimento. A parte de los errores experimentales de medición, la diferencia puede ser explicada con el hecho que el valor numérico se refiere a una simulación que asume alrededores a una temperatura constante de 50°C, mientras durante el experimento aproximadamente los primeros 10 cm de cable fueron sujetos a alrededores más calientes, debido a que la flama era distribuida sobre una zona y no en un punto.

Elevando la temperatura de la fuente térmica de 371°C a 500°C observamos otra vez concordancia entre los valores térmicos. En efecto, el experimento había proporcionado una temperatura de 122°C en correspondencia con el terminal externo de cobre (*punto B*) del dispositivo electrónico. Los valores numéricos en este caso (ver figura 11) son respectivamente de 125°C en la superficie externa del cable (superficie expuesta) y de 248°C en la sección metálica de cobre (superficie no expuesta). Los valores de temperatura de 102 y 105°C en la extremidad del cable a $z = 45$ cm se pueden considerar, prácticamente, iguales a lo del entorno que se mantiene a 100°C.

En relación con lo anterior es posible traer las siguientes conclusiones.

- a) Las simulaciones numéricas permiten obtener informaciones valiosas para determinar el comportamiento de los materiales bajo condiciones de uso

extremo, como podría ser en caso de incendios.

- b) Se confirma que en proximidad de una fuente de calor, los mecanismos que controlan la temperatura de un eventual dispositivo electrónico, protegido por un cubo de polímero concreto con ventana en mica, y de sus cables de conexión son: 1) la conducción del calor a través de la pared de polímero concreto y de la ventana de mica, con consecuente radiación desde las paredes internas hacia el dispositivo; 2) la conducción del calor a través del cable coaxial de conexión.
- c) En condiciones estacionarias, aplicando una fuente de calor que asegure una temperatura superior de 500°C en la región anterior de la pared de polímero concreto, se alcanzan temperaturas de 135°C en la superficie interna de la pared, de 125°C en la superficie externa del cable coaxial

externo (superficie expuesta) y de 248°C en la sección metálica de cobre del mismo cable coaxial (superficie no expuesta).

- d) La modelación computacional, llevada a cabo para simular el problema de transferencia de calor hacia un dispositivo electrónico en caso de incendio, ha resultado ser efectiva ya que existe una muy buena concordancia entre resultados numéricos y experimentales.

Bibliografía

- Chiné B., Condiciones Térmicas de Un Dispositivo Electrónico en Caso de Incendio: 1. Estudio Experimental, Tecnología en Marcha, vol. 20-4, 2007.
- Incropera F.P. y DeWitt D.P., *Fundamentos de Transferencia de Calor*, 4ª Edición, Prentice Hall, México, 1999.
- Comsol Multiphysics v. 3.3, COMSOL AB, 2006, Burlington, MA, USA.