

# Condiciones térmicas de un dispositivo electrónico en caso de incendio

## Primera parte: estudio experimental

Fecha de recepción: 04/05/07  
Fecha de aceptación: 08/05/07

Bruno Chinè<sup>1</sup>

*En este trabajo se presentan los resultados de un estudio experimental para determinar las condiciones térmicas a la cual un sistema electrónico, usado para radiocomunicaciones en túneles, podría estar sujeto en caso de incendio.*

### Palabras clave

Transferencia de calor, materiales, prueba al fuego.

### Key words

Heat transfer, materials, fire test.

### Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio experimental para determinar 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, ha sido realizada una prueba al fuego con registro experimental de los valores de temperatura en diferentes puntos del sistema mismo. El trabajo experimental ha

permitido analizar eficazmente la respuesta del dispositivo electrónico y de los distintos materiales que lo componen a las severas condiciones térmicas de prueba.

### Abstract

In this work we report the results of an experimental study carried out to determine 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 polymer concrete walls, has been analyzed by means of a fire test. Temperature values in different point of the system are been recorded. The experimental work has been successful, allowing for an effective study of the electronic device behavior and its material below severe test thermal conditions.

1. Profesor, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica, correo electrónico: [bchine@itcr.ac.cr](mailto:bchine@itcr.ac.cr).

## Introducción

En los últimos años, los experimentos de laboratorio se unen a la tecnología computacional para estudiar problemas de transferencia de calor bajo condiciones muy severas, como aquella que podrían encontrar diversos dispositivos tecnológicos, en caso de que ocurra un incendio en la proximidad de estos. 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 que componen estos dispositivos y la probabilidad que haya un inicio de combustión.

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio experimental realizado para determinar las condiciones térmicas a la cual un sistema electrónico, usado para radiocomunicaciones en túneles, podría estar sujeto en caso de incendio. En un artículo siguiente (Chiné, 2008) se reportan los resultados de simulaciones numéricas efectuadas con el *software* comercial Comsol Multiphysics para estudiar el mismo caso.

Las condiciones térmicas supuestas para este sistema son las que pueden originarse como consecuencia de un incendio en el interior de un túnel. Las temperaturas

ocasionadas por un incendio en un túnel pueden ser de hasta 1000 °C, así como lo demuestran casos de incendios reales en el túnel del Frejus entre Italia y Francia, 2005, en el túnel de la Daegu Subway, Corea del Sur, 2003 y en túnel de Mont Blanc entre Italia y Francia, 1999. Kotliar (2002) reporta otros casos igualmente importantes. En este trabajo, se asumen condiciones térmicas producidas por una fuente de calor con temperatura máxima de aproximadamente 400 °C, valor que corresponde a la temperatura que un bombero con equipo especial podría soportar y para las cuales evidentemente el sistema de radiocomunicaciones no debe fallar. Se considera además que el dispositivo electrónico puede alcanzar una temperatura máxima de aproximadamente 93 °C, superado, la cual el dispositivo no podría operar normalmente.

El sistema electrónico se compone de un dispositivo electrónico con bobina y terminales internos, contenidos en una caja metálica de acero inoxidable 316 (figura 1).

Al dispositivo se conectan un cable coaxial interno y un cable coaxial externo de cobre recubierto de una primera capa de mica y de una segunda de fibra de vidrio. Este último cable es para conectar el dispositivo a una red de comunicaciones. Sucesivamente, se supone que el dispositivo electrónico pueda ser colocado en una caja de polímero concreto y luego ser instalado en una pared de un túnel. Cabe señalar que el cable coaxial externo será introducido en el interior de la caja de polímero concreto a través de una ventana en material mica que será colocada en la pared anterior de la caja misma. Debido a la configuración del sistema en estudio, se considera que el calor producido por un hipotético incendio podría transferirse en el interior de la caja de polímero concreto a través de mecanismos de conducción en las paredes mismas de la caja y a través de conducción mediante el cable coaxial externo.

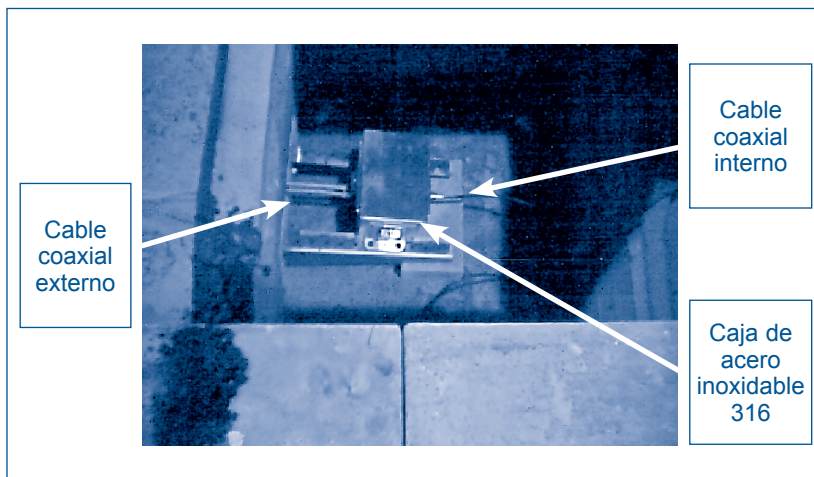


Figura 1: Dispositivo electrónico y cables coaxiales

El estudio experimental realizado mediante prueba al fuego, con el cual se estudia la transferencia de calor bajo las condiciones térmicas descritas anteriormente, se describe en los párrafos sucesivos.

## Trabajo experimental

En figura 2 se muestra el esquema de la instalación experimental con la caja en acero inoxidable que contiene el dispositivo electrónico, los cables coaxiales, la pared frontal de la caja en polímero concreto con ventana en mica, la dirección del fuego o de la fuente de calor y los puntos donde se registran los valores de temperatura. Las características principales de estos elementos se describen a continuación.

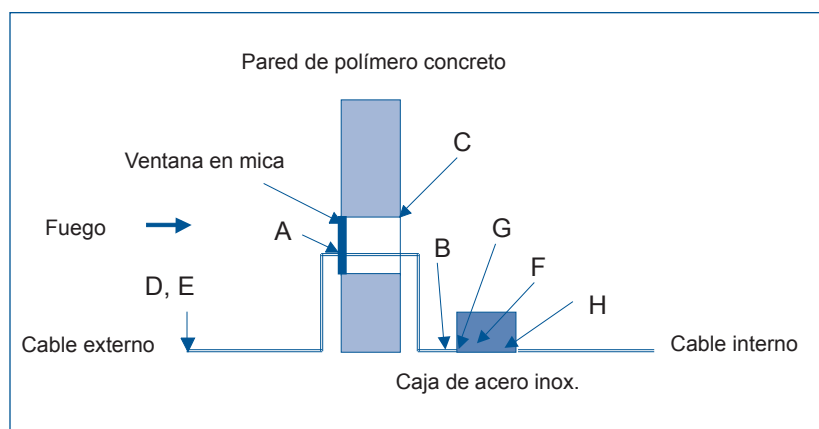


Figura 2. Componentes principales del sistema experimental y ubicación de los puntos de medición de temperatura (A, B, etc.)

## Dispositivo electrónico

Se compone de bobina y de los terminales internos del cable coaxial externo contenidos en una caja metálica de acero inoxidable 316. Existe, además, un cable coaxial interno conectado en la zona posterior de la bobina. Las dimensiones de la caja son largo de 152,4 mm, ancho y altura de 101,6 mm.

## Cable coaxial interno

Un cable coaxial del cual en este cálculo no interesan dimensiones y propiedades.

## 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).

## Caja de polímero concreto

La caja de polímero concreto se puede aproximar a un cubo de lado igual a 660 mm, de tal manera que el ancho y el alto de la pared frontal del cubo son de 660 mm cada uno. 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 más 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 se construye con 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, siendo igual a 0,04 W/(m K). En casos más severos se puede considerar una conductividad térmica de 0,5 W/(m K) (Incropera y DeWitt, 1999).

Completada la construcción de las otras paredes del cubo con losetas de material refractario, se coloca en su interior la caja de acero inoxidable con el dispositivo electrónico. La caja de acero inoxidable se posiciona con su borde frontal a 150 mm de la superficie interior de la pared de polímero concreto; es decir, a 200 mm aproximadamente de la superficie externa

de la misma pared. Seguidamente, el cable coaxial externo se conecta al dispositivo electrónico, luego se introduce en la ventana de mica y finalmente se posiciona con la extremidad anterior hacia el externo de la pared. El sistema se sella con el propósito de minimizar las pérdidas de calor convectivas, dejando una pequeña fisura para poder medir con instrumento óptico la temperatura de las zonas internas de la caja de polímero concreto. En la figura 3 se muestra el arreglo experimental usado. Seguidamente, para simular la flama de un incendio se usa un mechero tipo Bunsen y como combustible gas propano líquido, mezclado con aire atmosférico. La temperatura de las regiones cubiertas por la flama es función del tiempo de aplicación del calor y puede variar entre los 300 y los 400 °C. La flama se dirige y se distribuye hacia la ventana de mica, manteniéndola en esa posición por el tiempo de duración de la prueba. Cabe señalar que la flama se distribuye contemporáneamente hacia la ventana de mica, las zonas de polímero concreto próximas a la ventana y el punto de salida del cable coaxial externo (véase figura 3).



Figura 3. Arreglo experimental usado para el ensayo al fuego

De acuerdo con los objetivos del experimento, los puntos seleccionados para la medición de temperatura e indicados en figura 2 son los siguientes:

*Punto A:* Superficie externa de la ventana de mica, directamente cubierta 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 F:* Terminal interno del cable coaxial externo posicionado en el interior de la caja metálica.

*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.

*Punto H:* En la superficie externa del cable coaxial interno conectado a la zona posterior de la bobina

Las temperaturas se miden mediante un termómetro a infrarrojo con puntero láser que presenta una precisión de  $\pm 1,5\%$  del valor de lectura. En los puntos de difícil acceso se usan testigos de temperatura adhesivos que registran los valores máximos.

## Resultados obtenidos en el trabajo experimental

El trabajo experimental se desarrolla mediante las siguientes tres pruebas.

### Prueba 1

Después de precalentar por diez minutos la zona de la ventana de mica, se miden las temperaturas en un tiempo total de 35

minutos, usando intervalos de medición de 5 minutos, mientras se sigue aplicando calor en la misma región. En el cuadro 1 se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo de la prueba. Durante el experimento, se observa que, después de aproximadamente 25 minutos, el polímero concreto comienza a arder, siendo la temperatura en esa región de aproximadamente 320 °C.

Cuadro 1. Valores de temperatura en la prueba 1

Tiempo (min)	Temperatura (°C)			
	Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
5	320	29	34	49
10	243	33	57	51
15	222	42	77	56
20	223	43	86	56
25	271	52	89	59
30	306	53	96	50
35	281	55	93	47

### Prueba 2

Después de una pausa de 5 minutos; es decir, sin aplicación de calor, y posteriormente a un precalentamiento de 5 minutos, se miden nuevamente las temperaturas por un tiempo total de 20 minutos, mientras se sigue aplicando el calor como descrito.

Los tiempos y los valores de temperatura se presentan en el cuadro 2.

### Prueba 3

Esta prueba se realiza con el fin de investigar las condiciones del sistema electrónico en condiciones térmicas más extremas; para ello se ubica la caja metálica

Cuadro 2. Valores de temperatura en la prueba 2

Tiempo (min)	Temperatura (°C)			
	Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
5	284	54	104	52
10	270	58	104	54
20	331	65	112	60

que contiene el dispositivo electrónico a solo 50 mm del borde interior del polímero concreto. Se precalienta por 10 minutos la zona frontal del sistema, y luego se aplica calor con más intensidad, de tal manera que la temperatura en la región frontal del sistema (*Punto A*) pueda alcanzar los 400 °C. Los tiempos y los valores de

temperatura se presentan en el cuadro 3. Cabe señalar que durante el experimento se observa que el polímero concreto vuelve a arder, y la temperatura registrada en esa regiones de aproximadamente 335 °C.

Finalmente, mediante los testigos adhesivos se registran los valores de temperatura de el cuadro 4.

**Cuadro 3.** Valores de temperatura en la prueba 3

Tiempo (min)	Temperatura (°C)				
	<i>Punto A</i>	<i>Punto B</i>	<i>Punto C</i>	<i>Punto D</i>	<i>Punto E</i>
5	324	122	90	50	46
10	380	126	116	54	56
20	275	122	113	50	49
30	400	122	133	64	58

**Cuadro 4.** Valores de temperatura registrados mediante testigos en la prueba 3

Punto	Temperatura
<i>B</i>	valor > 93 °C
<i>C</i>	valor cercano a los 160 °C
<i>F</i>	valor > 93 °C
<i>G</i>	valor cercano a los 130 °C
<i>H</i>	valor cercano a los 71 °C

### **Análisis de los resultados experimentales**

Después de 30÷35 minutos de aplicación de calor, con temperaturas de alrededor de 300 °C en la región frontal de la ventana de mica (*Punto A*), los resultados de la primera prueba experimental demuestran que:

- la región posterior de la pared de polímero concreto (*Punto C*) alcanza temperaturas superiores a los 90 °C;
- el terminal externo del cable coaxial externo (*Punto B*), ubicado en la

sección anterior de la caja metálica, registra temperaturas superiores a los 50 °C;

- el revestimiento externo de la extremidad anterior del cable coaxial (*Punto D*), ubicado a 400 mm del punto de salida desde la ventana de mica, alcanza temperaturas de aproximadamente 60 °C.

Mediante la segunda prueba experimental, aplicando calor por un periodo adicional de 20 minutos, se nota un aumento de las

temperaturas en el sistema, con excepción del cable coaxial externo. Se observa que:

- a) la región posterior de la pared de polímero concreto aumenta su temperaturas hasta valores superiores a los 110 °C;
- b) el terminal externo del cable coaxial de cobre, ubicado en la sección anterior de la caja metálica, presenta una temperatura de 65 °C;
- c) el revestimiento externo de la extremidad anterior del cable coaxial, aproximadamente a 400 mm del punto de salida desde la ventana de mica, mantiene el valor de su temperatura inferior a los 60 °C.

Finalmente, después de haber aplicado condiciones térmicas más severas mediante la tercera prueba, se observa un sensible aumento de temperatura especialmente en correspondencia de los *Puntos B y C*. En efecto:

- a) la región posterior de la pared de polímero concreto aumenta su temperaturas hasta valores superiores a los 130 °C;
- b) el terminal externo del cable coaxial de cobre, que se encuentra ubicado en la sección anterior de la caja metálica a solo 50 mm del borde interior de la pared de polímero concreto, casi duplica su temperatura alcanzando valores superiores a los 120 °C;
- c) el revestimiento externo de la extremidad anterior del cable coaxial, aproximadamente a 400 mm del punto de salida desde la ventana de mica mantiene el valor de su temperatura cercano a los 60 °C.

Los valores anteriores son confirmados por los testigos adhesivos. De hecho, en la región posterior de la pared de polímero concreto el testigo registra valores máximos cercanos a 160 °C y en el terminal externo del cable coaxial externo, ubicado en la sección anterior de la caja metálica, se miden valores mayores a 93 °C.

Las condiciones térmicas en correspondencia de la caja metálica que contiene el dispositivo electrónico se pueden analizar a partir de los datos del cuadro 4. Los datos muestran que el mayor calor aplicado en la zona frontal del panel de polímero concreto y la menor distancia entre panel y dispositivo causan que este último presente valores de temperatura elevadas, si comparados con el valor máximo permitido de 93 °C.

La zona anterior de la caja de acero inoxidable, más expuesta a la transferencia de calor por radiación proveniente de la superficie de polímero concreto que se encuentra a una temperatura de casi 160 °C, presenta una temperatura de 130 °C. El mismo terminal del cable coaxial externo, que se encuentra ubicado en la zona anterior de la caja de acero inoxidable, registra una temperatura superior a los 93 °C, que concuerda con los valores de 120 °C medidos con el termómetro a infrarrojo. En este caso, el efecto resultante de la cercanía del terminal a la pared de polímero concreto y el mayor flujo de calor aplicado en la pared misma inducen un sensible aumento de temperatura en el terminal. Mecanismos de transferencia de calor hacia el mismo terminal del cable son la radiación térmica desde la pared interna del polímero concreto y la conducción térmica a la largo del cable mismo. Sería importante, por lo tanto, poder evaluar los efectos por separado; es decir, calcular la distribución de temperatura en el cable, debido por ejemplo a la sola conducción de calor usando simulaciones numéricas y evaluar así si la conducción de calor puede determinar valores de temperatura límites.

Finalmente, en la zona posterior de la caja de acero inoxidable, la temperatura de 71 °C registrada en correspondencia del cable coaxial interno se justifica con el hecho que esta zona es más alejada del panel de polímero concreto y de la ventana de mica y, en consecuencia, menos expuesta a la radiación térmica.

*Las condiciones térmicas en correspondencia de la caja metálica que contiene el dispositivo electrónico se pueden analizar a partir de los datos del cuadro 4. Los datos muestran que el mayor calor aplicado en la zona frontal del panel de polímero concreto y la menor distancia entre panel y dispositivo causan que este último presente valores de temperatura elevadas, si comparados con el valor máximo permitido de 93 °C*

## Conclusiones

De acuerdo con los resultados experimentales es posible traer las siguientes conclusiones:

- a) Los ensayos de laboratorio, aunque efectuados con instrumentación simple, permiten obtener informaciones valiosas para determinar el comportamiento de los materiales en condiciones de uso extremo, como podría ser en caso de incendios.
- b) En las proximidades de una fuente de calor, los mecanismos que controlan la temperatura de un eventual dispositivo electrónico, protegido por una caja 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) Los dos mecanismos anteriores están interrelacionados, ya que las condiciones térmicas del cable coaxial dentro de la caja de polímero concreto dependen de la temperatura de los alrededores. A su vez, esta temperatura esta en relación directa con las temperaturas de la pared interna de la tapa de polímero concreto y de la ventana de mica.
- d) Aplicando una fuente de calor que asegure una temperatura superior a los 300 °C en la región anterior de la pared de polímero concreto, después de aproximadamente 1 hora se alcanzan temperaturas cercanas a los 65 °C en el terminal externo del cable coaxial que se encuentra a una distancia de 150 mm del borde interno de la pared.
- e) Las pruebas efectuadas indican que la pared de material polímero concreto muestra inicios de combustión cuando alcanza temperaturas de aproximadamente 320 °C. La ventana en material mica en cambio soporta muy bien las temperaturas del ensayo.
- f) Aplicando calor por aproximadamente 30 minutos adicionales, de tal manera que temperatura en la región anterior de la pared de polímero concreto se eleve a casi 400 °C, las temperaturas de los elementos del dispositivo electrónico sobrepasan completamente los límites permitidos de 93 °C, cuando el dispositivo se encuentra a solos 50 mm del borde interno de la pared.
- g) El cable coaxial externo mantiene temperaturas inferiores a 93 °C para distancias superiores a aproximadamente 400 mm desde la zona con aplicación del calor. En este caso es necesario que la temperatura alrededor del cable no sea próxima a los 93°C, ya que el cable puede alcanzar el equilibrio térmico con el ambiente que lo rodea.
- h) En condiciones extremas, los elementos del dispositivo electrónico alcanzan la temperatura de la pared de polímero concreto y de la ventana de mica.

## Agradecimientos

El autor desea agradecer al Ing. Mario Conejo S. y al técnico Sr. Erick Sánchez L., de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del ITCR por la colaboración prestada.

## Bibliografía

1. Chiné B., "Condiciones Térmicas de Un Dispositivo Electrónico en Caso de Incendio: 2. Simulación Numérica", *Tecnología en Marcha*, vol. 21-1, (en prensa).
2. Kotliar I.K., *Catastrophic Tunnel Fires Can Be Prevented and Suppressed. Tunnel Fires*, 4<sup>th</sup> International Conference, Basel, December, 2002.
3. Incropera F.P. y DeWitt D.P., *Fundamentos de Transferencia de Calor*, 4.a edición, Prentice Hall, México, 1999.