

Transductor de fibra óptica para la medida de alta temperatura en procesos automatizados de producción de acero

F.J.Madruga, D.A.González, V.Álvarez, O.Conde, M.Lomer J.M.López Higuera
Grupo de Ingeniería Fotónica, Universidad de Cantabria
Avd. de Los Castros s/n, Santander CANTABRIA 39005
Tfno: 942 201560 Ext.18 Fax: 942 201473 Email: madruga@teisa.unican.es.

Áreas de interés: Sensores, Fibras ópticas.

Palabras clave: Transductores de alta temperatura, fibras ópticas, producción de acero.

1.- Introducción.

La correcta medida de temperaturas cercanas o superiores a los 1000°C, se ha convertido en un hecho clave para conseguir un control optimizado de los más diversos procesos industriales.

Los soluciones actualmente ofrecidas, presentan problemas de precisión en la medida, ya que pretenden cubrir un amplio rango de temperaturas y además son muy vulnerables a parámetros externos, que en ocasiones son difíciles de controlar [1].

La perfecta definición del rango de temperaturas a medir dentro del proceso de enfriamiento que se produce en las "palanquillas" de acero, la mejora de la calidad del acero que se consigue con este control y la posibilidad de desarrollar un sistema sensor específico y de bajo coste basado en fibra óptica son los objetivos del presente trabajo.

2.- Teoría.

La posibilidad de guiado de la radiación emitida por un cuerpo caliente sin necesidad de un medio físico [2] y a través de una fibra, hace que pueda emplearse ésta última para desarrollar un sensor de temperatura.

Se puede definir cuerpo negro como un perfecto radiador [3], esto es, dada una temperatura y una longitud de onda, es el máximo generador de radiación posible (el espectro de radiación emitido por un cuerpo negro en función de su temperatura se encuentra definido por la Ley de Planck). La aproximación más cercana al cuerpo negro ideal es una cavidad con una superficie interior a temperatura uniforme, que presenta una apertura cuyo diámetro es más pequeño que las dimensiones de la propia cavidad. De esta manera, la mayoría de la radiación que penetra por la apertura es absorbida o reflejada (para finalmente ser absorbida), mientras que la radiación saliente es despreciable. En definitiva, el cuerpo se comporta como un sumidero de radiación casi perfecto e independiente de las propiedades de la superficie interna.

Aunque se han desarrollado numerosos estudios teóricos sobre las propiedades de las cavidades isotermales [4,5], la forma geométrica de los cuerpos negros reales es habitualmente

un compromiso entre rendimiento, tamaño y coste de producción.

Teniendo en cuenta el efecto de la geometría sobre la emisividad, la potencia total radiada por un material es el producto entre la emisividad efectiva y la radiación de un cuerpo negro a la misma temperatura, y es proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia, como recoge la Ley de Stephan-Boltzmann.

La captación de parte de esa potencia radiada puede realizarse con fibra óptica, debido a su transparencia en el rango espectral del infrarrojo. El porcentaje de la relación entre la irradiancia en un rango espectral determinado y la irradiancia total de la fuente viene dado por la Ley de Stephan-Boltzmann, y se define como [6]:

$$\eta = \frac{C_1}{C_2^4 \sigma} \left[3! e^{-x_2} \sum_{i=0}^3 \frac{x_2^i}{i!} - 3! e^{-x_1} \sum_{i=0}^3 \frac{x_1^i}{i!} \right] \quad (1)$$

donde:

$$x_1 = \frac{C_2}{\lambda_1 T}, \quad x_2 = \frac{C_2}{\lambda_2 T}$$

(2)

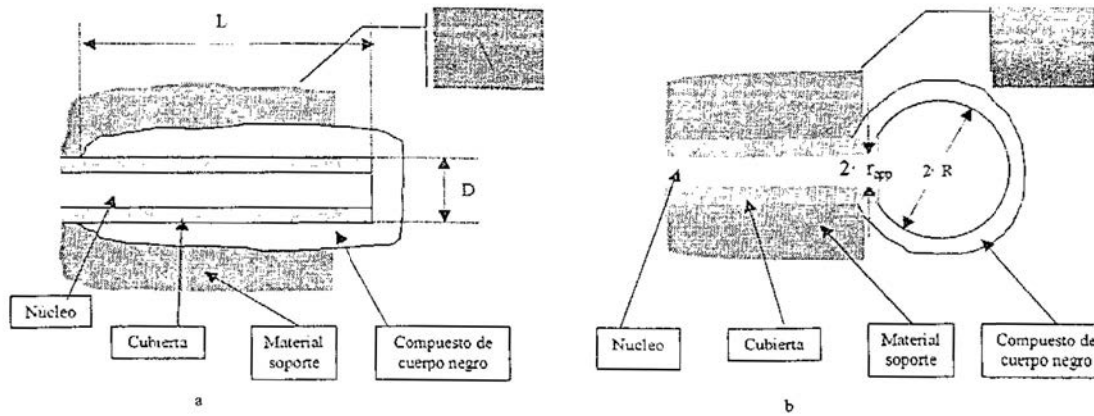
en el rango de longitudes de onda $\lambda_1 - \lambda_2$.

Por lo tanto, puede calcularse la temperatura de cualquier objeto como una función de su emisividad, del rango espectral de detección y del área del transductor, y así, el transductor propuesto se puede usar como un pirómetro. Aplicando las ideas que se acaban de introducir en esta sección, diversos autores han desarrollado diferentes sistemas [7-10] para la medida de temperatura usando fibras ópticas.

3.- Arquitectura del transductor.

El correcto diseño de una cavidad de cuerpo negro es complejo y exige la utilización de materiales con unas características muy concretas dependiendo del rango de temperaturas en el que se va trabajar. Por una parte, se debe emplear un material con una alta conductividad térmica, que permita un calentamiento homogéneo de la cavidad. Por otra parte, el material debe tener una emisividad superficial relativamente alta (al menos por encima de 0.5), que permita tener una emisividad efectiva cercana a la ideal e independice las medidas finales de las

variaciones que la temperatura pueda provocar



sobre la emisividad superficial.

Figura 1. Esquema y fotografía de las cabezas a) cilíndrica y b) esférica.

El material empleado para crear la cavidad de cuerpo negro es una mezcla de dos cerámicas: alúmina y una pintura cerámica de alta emisividad. El objetivo es obtener un compuesto que alcance las propiedades físicas deseadas y presente una buena adherencia sobre la fibra. El extremo de la fibra es convenientemente cortado y tratado para que presente una determinada forma geométrica, en nuestro caso, esférica y cilíndrica. La mezcla se sitúa sobre el extremo de la fibra creándose la cavidad, y en consecuencia, la cabeza sensora.

En un principio, arquitecturas de cilindro y de esfera han sido diseñadas y fabricadas para comprobar su comportamiento con respecto a las prestaciones teóricamente deducidas.

Si se asume que es difusa e isoterma, la emisividad efectiva de una cavidad esférica puede escribirse como [4]:

$$\epsilon_a = \frac{\epsilon}{1 - (1 - \epsilon) \frac{1 + \cos \left(\arcsen \left(\frac{r_{app}}{R} \right) \right)}{2}} \quad (3)$$

donde ϵ es la emisividad superficial, r_{app} es el radio de la apertura y R es el radio de la esfera.

Análogamente, una cavidad cilíndrica presenta una emisividad efectiva de [11]:

$$\epsilon_{eff} = \epsilon \frac{1 + 4L/D}{1 + \epsilon(4L/D)} \quad (4)$$

donde ϵ es la emisividad superficial, L es la longitud de la cavidad y D es su diámetro.

4.- Medidas experimentales.

En la figura 2 se puede observar el esquema del banco de medida montado para estudiar la respuesta de los diferentes transductores, es decir la relación que existe entre la potencia medida y la temperatura a la cual está el objeto y su comportamiento al estar sometidos a altas temperaturas. Se puede apreciar que una fuente patrón de cuerpo negro radia en la dirección del transductor. Cuando éste recibe la radiación,

emite una cantidad equivalente a través de un canal óptico de 100 metros, que es medida por un medidor de potencia óptica AGILENT 8163 o por un analizador de espectros ópticos ANRITSU MS9701A.

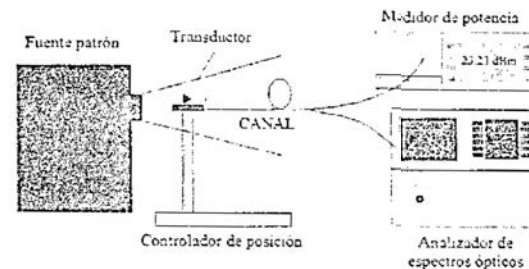


Figura 2. Montaje de medida para el estudio del rendimiento de los transductores.

La radiación generada por el transductor se mide con un fotodetector que cubre un rango de longitudes de onda de 1 a 1.7 μm . En la figura 3 queda reflejado el porcentaje de la radiación emitida en ese rango en relación con la radiación total dada por la Ley de Planck. Se han construido dos tipos de transductores: con forma cilíndrica y con forma esférica. Con el fin de obtener una emisividad efectiva cercana a la ideal, se han diseñado con unas dimensiones apropiadas para que la relación entre la longitud y el diámetro, en el caso del cilindro, y la relación entre los radios de la esfera y de la apertura, en el caso del transductor esférico, tenga un valor de 6.

Con esas dimensiones, la emisividad efectiva de la esfera y del cilindro adquieren valores de 0.997 y 0.99 respectivamente.

El hecho de que la esfera presente una emisividad efectiva mayor, aumenta la potencia en el detector, y permite determinar con más precisión, a través de la medida del espectro, la temperatura del transductor (ver figuras 4 y 5).

5.- Conclusiones.

Los resultados del experimento muestran que el transductor esférico es mejor que el cilíndrico, ya que su comportamiento se aproxima más al cuerpo negro ideal, pudiendo trasladarse de forma muy precisa la potencia medida a un valor de temperatura del transductor, pero también su fabricación resulta más compleja y costosa.

Por otra parte, es posible emplear fotodetectores de comunicaciones ópticas para la medida de la potencia de la radiación de cuerpo

negro alrededor de los 1000°C lo que reduce el costo del sistema de forma muy considerable.

Finalmente, el transductor puede utilizarse para medidas sin contacto, aplicando la corrección adecuada que se obtiene de un modelo de transferencia del calor[12]. El límite de la distancia entre el transductor y el objeto a medir es de unos 20 cm, pero dicha distancia puede mejorarse empleando otro rango de longitudes de onda de medida, en el que el porcentaje de potencia emitida sea mayor.

Y que puede ser obtenido tal y como se ha obtenido la figura 3.

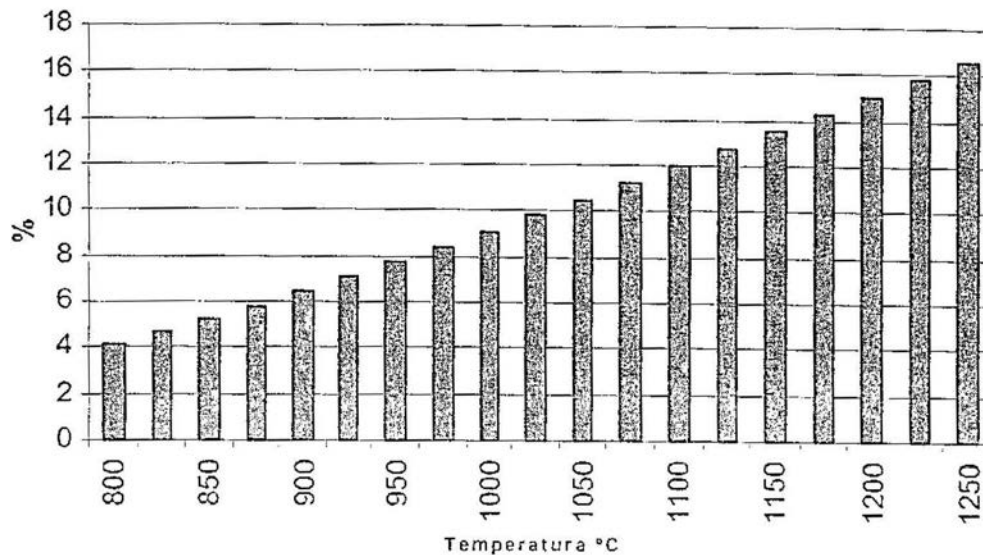


Figura 3. Porcentaje de la radiación total que es emitida en el rango 1-1.7 μm .

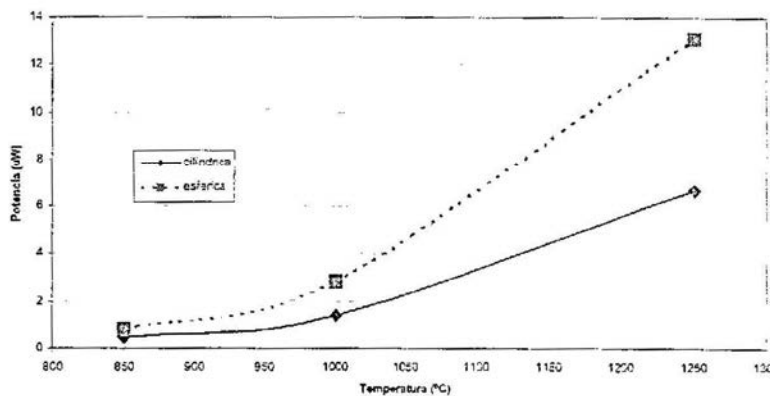


Figura 4. Potencia medida con los transductores esférico y cilíndrico.

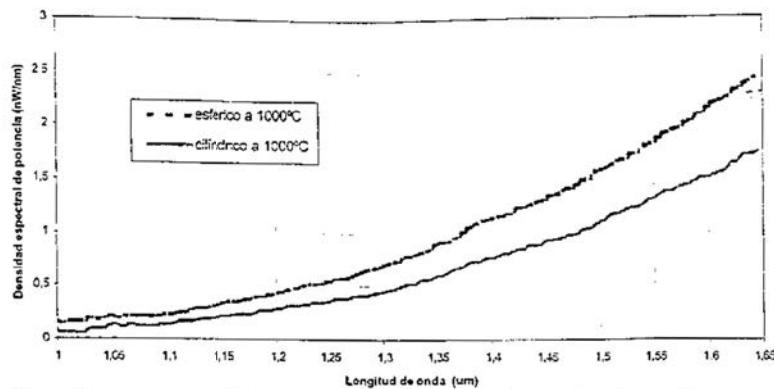


Figura 5. Densidad espectral de potencia medida con las cavidades esférica y cilíndrica.

6.- Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Unión Europea su financiación de este proyecto a través del proyecto SOTEPAC FEDER IFD97-1996.

7.- Bibliografía.

- [1] Informe del primer año del "Proyecto SOTEPAC". realizado por Grupo de ingeniería fotónica y la empresa Global Steel Wire.
- [2] J.P. Holman, "Transferencia de Calor", 8ª ed, (1ª en español), Ed.: McGraw Hill-Interamericana de España, D.L. 1998
- [3] R.P. Madding. "Science behind thermography", Proc. SPIE, Vol. 371, pp.2-9, 1982.
- [4] Raymond J. Chandos and Robert E. Chandos. "Radiometric properties of isothermal diffuse wall cavity sources". Applied Optics, Vol. 13, No. 9, pp. 2141-2152, 1974.
- [5] Ernst W. Treuenfels. "Emissivity of isothermal cavities". Journal of the Optical Society of America, Vol. 53, No. 10, pp. 1162-1171, 1963.
- [6] L. Shichun, L. Fei, S. Xiu'e, "The optimum efficiency of production of radiation - A new relation for black body radiation.", Infrared Physics, Vol. 29, pp. 205-207, 1989.
- [7] R.R. Dils, "High temperature optical fiber thermometer", J. Appl. Phys. 54, 1198-1200 (1983).
- [8] M. Gottlieb and G.B. Brandt, "Fiber-optic temperature sensor on internally generated thermal radiation", Appl. Opt. Vol.20, No.19, pp. 3408-3414, 1981.
- [9] Yonghang Shen *et al.* "Sapphire fiber thermometer ranging from 20 to 1800 °C", Applied Optics, Vol. 38, No. 7, pp. 1139-1143, 1999.
- [10] S.J. Saggese, J.A. Harrington and G.H. Sigel, "Hollow sapphire waveguides for remote radiometric temperature measurements", Electronic letters, Vol. 27, No.9, pp. 707-709, 1991.
- [11] W. Zhihai, C. Jiahua, Z. Hanyi and Z. Bingkun. "A sensitive high-speed and high-temperature optical fiber sensor". J. Tsinghua Univ. 28 (s3) 31-8, 1986.
- [12] J. M. López Higuera, F. J. Madruga, D.A. González, V. Alvarez y J. Hierro. "High temperature optical fiber transducer for smart structure on iron steel production industry" SPIE. 8th Annual International Symposium on SMART STRUCTURES AND MATERIALS, Newport Beach California 4-8 March 2001.