

RESPUESTA A LA HIPERTERMIA ELECTROMAGNÉTICA DE UN SENSOR DE TEMPERATURA BASADO EN FIBRA ÓPTICA

L. Leija, A. Vera, R. Romo⁽¹⁾

⁽¹⁾Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Av. I.P.N. 2508, Col. San Pedro Zacatenco, México, D.F., e-mail: lleija@mail.cinvestav.mx

ABSTRACT

The development of a sensor of temperature based on optical fiber sensors is presented. The sensor will be used in an experimental hyperthermia laboratory to characterize applicators and temperature distribution in phantoms subjected to controlled electromagnetic radiations.

The temperature sensor is built with a glass optical fiber, in which part of their cladding was replaced by an oil. The variation of the oil refractive index with temperature modulates the optical power transmitted along the fiber, then the probe works based on the principle of evanescent field sensors.

As advantage, the temperature sensor is not affected by the electromagnetic radiations.

The measurements have a repeatability error less than 0,5 % in the range of interest (20 °C to 40°C). The sensors have a low thermal time constant (1,9 s), then the time required to perform a complete mapping in a plane of the phantom is reduced.

RESUMEN

Se presenta el desempeño de un sensor de temperatura basado en fibra óptica sometido a radiaciones electromagnéticas. El sensor será utilizado en un laboratorio experimental de hipertermia electromagnética para caracterizar aplicadores y determinar la distribución de temperaturas en materiales sustitutos de tejido biológico (*phantom*) sometidos a radiaciones electromagnéticas.

El sensor de temperatura está constituido por una fibra óptica de vidrio, en la cual una sección de su recubrimiento óptico fue sustituido por un aceite. Trabaja bajo el principio de los sensores de campo evanescente, es decir, que la variación del índice de refracción del aceite con la temperatura modula la potencia óptica transmitida a través de la fibra.

El sensor de temperatura, tiene la ventaja de que puede ser utilizado en ambientes donde existen radiaciones electromagnéticas.

Las mediciones que realiza poseen un error por repetibilidad menor al 1 % dentro del intervalo de temperatura de interés (20 °C a 40 °C) y la constante de tiempo del sensor es de 1,9 s lo cual permitirá realizar un mapeo completo de temperatura en phantoms para hipertermia.

RESPUESTA A LA HIPERTERMIA ELECTROMAGNÉTICA DE UN SENSOR DE TEMPERATURA BASADO EN FIBRA ÓPTICA

L. Leija, A. Vera, R. Romo⁽¹⁾

⁽¹⁾Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Av. I.P.N. 2508, Col. San Pedro Zacatenco, México, D.F., e-mail: lleija@mail.cinvestav.mx

RESUMEN

Se presenta el desempeño de un sensor de temperatura basado en sensores de fibra óptica sometido a radiaciones electromagnéticas. El sensor será utilizado en un laboratorio experimental de hipertermia electromagnética para la caracterización de aplicadores y determinar la distribución de temperaturas en materiales sustitutos de tejido biológico (*phantom*) sometidos a radiaciones electromagnéticas.

El sensor de temperatura está constituido por una fibra óptica de vidrio, en la cual una sección de su recubrimiento óptico fue sustituido por un aceite. Trabaja bajo el principio de los sensores de campo evanescente, es decir, que la variación del índice de refracción del aceite con la temperatura modula la potencia óptica transmitida a través de la fibra.

El sensor de temperatura, a diferencia de otros sensores, puede ser utilizado en ambientes donde existen radiaciones electromagnéticas intensas.

Las mediciones que realiza poseen un error por repetibilidad menor al 1 % dentro del intervalo de temperatura de interés (20 °C a 40 °C) y la constante de tiempo del sensor es de 1,9 s, lo cual permitirá realizar un mapeo completo de temperatura en *phantoms* para hipertermia.

1. INTRODUCCION

La hipertermia es un procedimiento médico que consiste en elevar localmente, mediante medios externos, la temperatura de un paciente, con el fin de destruir células cancerosas. Se ha demostrado que las células cancerosas pueden ser destruidas si se realiza un

tratamiento de calentamiento prolongado a temperaturas de 6 °C a 8 °C por arriba de la temperatura normal del cuerpo [1].

Los medios para producir esta elevación de temperatura son diversos, sin embargo, uno de los medios más utilizados, el uso de las ondas electromagnéticas. Es necesario que los equipos utilizados en esta terapia sean evaluados para determinar ciertas características de interés para los médicos, como son, profundidad de penetración, talla de campo efectivo y patrón de radiación, entre otros. Los métodos de evaluación pueden ser directos o indirectos; en el caso de las evaluaciones indirectas, éstas se llevan a cabo mediante la medición de temperatura en un sustituto de tejido (*phantom*), de aquí, el interés de contar con sensores de temperatura que cumplan con determinadas características que nos permitan realizar adecuadamente estas mediciones.

Los termistores, termopares y otros sensores convencionales poseen numerosas ventajas que los hacen atractivos para ser utilizados en la caracterización de temperatura en hipertermia. Dentro de estas ventajas se pueden mencionar: tamaño pequeño, gran exactitud, excelente confiabilidad y bajo costo. Sin embargo, este tipo de sensores también posee una gran desventaja, que es el hecho de estar constituidos por componentes metálicos conductivos, blindajes y cables de conexión. Estas partes metálicas son a menudo la causa de errores considerables en la medición de temperatura cuando las sondas se utilizan para caracterizar equipos de hipertermia en *phantoms* sometidos a radiaciones electromagnéticas. Estos errores de medición son ocasionados por tres fenómenos, que pueden presentarse solos o actuando en combinación:

1. Calentamiento del sensor por corrientes inducidas.

2. Perturbación del campo electromagnético.
3. Interferencia electromagnética.

Los termómetros basados en fibras ópticas ofrecen la ventaja de no poseer componentes metálicos, y por lo tanto no perturbar los campos electromagnéticos. La idea básica consiste en modular la intensidad o la fase de la luz que se propaga a través de la fibra óptica. El principio de funcionamiento del sensor depende del método de modulación utilizado.

Los sensores modulados en fase utilizan técnicas interferométricas y ofrecen una alta sensibilidad y resolución [2]. Sin embargo, su implementación requiere métodos complejos de estabilización y un procesamiento adicional, lo que los hace poco atractivos para algunas aplicaciones. Los sensores modulados en intensidad son menos sensibles que los modulados en fase, pero se utilizan más ampliamente debido a su relativa sencillez. Dentro de este tipo de sensores se encuentran los sensores fluorescentes [3], los basados en la variación de intensidad causada por absorción en un cristal semiconductor [4] y los sensores de campo evanescente [5]. Los sensores evanescentes modulan la intensidad del haz de luz que se envía a través de una fibra multimodo. En este tipo de sensores mide la variación de potencia óptica transmitida a través de la fibra, cuando parte del recubrimiento óptico se reemplaza por un material cuyo índice de refracción varía con la temperatura. Entre los materiales para reemplazar el recubrimiento óptico se han utilizado aceites vegetales [5] y compuestos siliconados [6].

2. DESCRIPCIÓN DEL SENSOR TEMPERATURA Y SU PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Para la fabricación de este sensor de temperatura, el recubrimiento de una fibra óptica es reemplazado por un compuesto que varía su índice de refracción con respecto a la temperatura, para este fin, pueden utilizarse líquidos, como aceites u otras sustancias orgánicas, o bien elastómeros sólidos.

El funcionamiento de este tipo de sensor puede explicarse a través de un modelo teórico, basado en la teoría de las fibras de escasa conducción (weakly guiding fibers), el cual se correlaciona de manera bastante aproximada con los resultados experimentales obtenidos.

Suponiendo un material de recubrimiento óptico cuyo índice de refracción dependa de la temperatura, podemos hallar una expresión para la potencia (normalizada) en el extremo de la fibra en función de la temperatura de la siguiente manera:

$$P_{norm} = 1 - \frac{2\sqrt{2}}{3\pi \left(\frac{a_1}{\lambda} \right) (n_1^2 - n_2(T)^2)^{3/2}}$$

donde a_1 es el radio del núcleo de la fibra, λ es la longitud de onda de operación, n_1 es el índice de refracción del núcleo de la fibra, y n_2 el índice de refracción del recubrimiento. De esta expresión, podemos ver que la potencia transmitida a través de la fibra es dependiente de la temperatura (T).

Para la fabricación del sensor se empleó fibra óptica de vidrio multimodo de 62,5 μm de diámetro del núcleo y 125 μm de diámetro del recubrimiento óptico. Para eliminar el recubrimiento óptico se utilizó un ácido, este recubrimiento fue reemplazado por un aceite purificado introducido a un tubo de vidrio, con lo cual fue posible lograr la repetibilidad en la producción de varios sensores. La Figura 1 muestra los detalles del sensor.

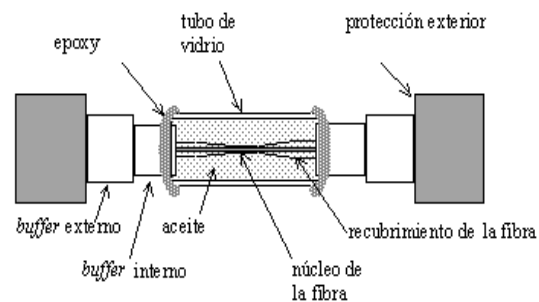


Figura 1. Diagrama del sensor.

En el diseño final del sensor se utilizó un tubo de acrílico por encima para otorgar al sensor una mayor resistencia mecánica. Las dimensiones finales del sensor son aproximadamente de 2 cm de largo por 0,5 cm de ancho, sin embargo, es posible pensar que estas dimensiones pueden reducirse ya que el soporte mecánico es el que determina las dimensiones finales del sensor.

3. RESULTADOS

Se evaluaron las características estáticas (curva de calibración y repetibilidad) y dinámicas (constante de tiempo térmica) del sensor de temperatura, así como también se realizaron pruebas al sensor sometándolo a campos electromagnéticos.

Para realizar estas pruebas se utilizó un multímetro óptico (Hewlett Packard 8153 A) provisto de un módulo de fuente óptica (Hewlett Packard 81551MM) y un módulo sensor de potencia óptica (Hewlett Packard 81532A). El sensor se colocó entre la fuente óptica y el sensor de potencia. Para obtener las temperaturas de referencia se utilizó un termómetro con sensor de termopar con una exactitud de 0.1 $^{\circ}\text{C}$ (TES-1310). La figura 2, muestra las curvas de calibración para tres experimentos realizados con el sensor.

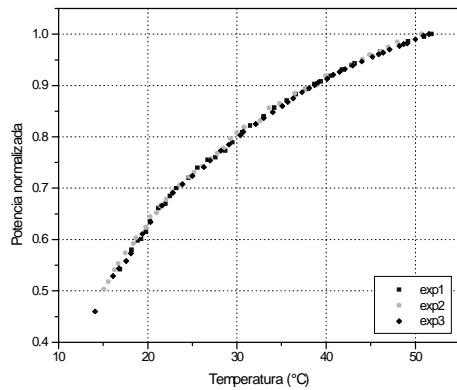


Figura 2. Curvas de calibración para tres experimentos realizados con el sensor.

Para calcular la constante de tiempo de los sensores se sometió a un sensor de prueba a un incremento escalón de temperatura y se verificó su respuesta con el multímetro óptico. Se colocó inicialmente el sensor en un baño termostatzado a 26 °C, y se esperó a que la potencia óptica se mantuviera estable. Luego, se procedió a pasar rápidamente el sensor a otro baño termostatzado, que estaba a una temperatura homogénea de 53.8 °C. Se midió la potencia óptica en función del tiempo, la cual se presenta en la figura 3.

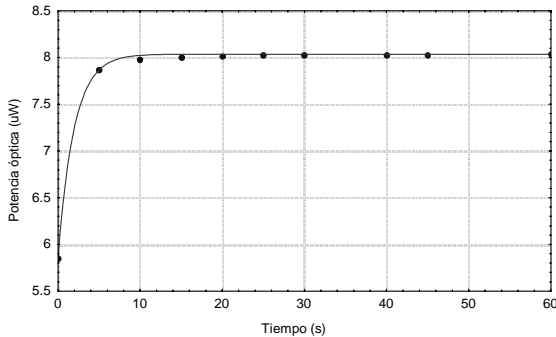


Figura 3. Respuesta dinámica del sensor ante una entrada que varía bruscamente. Los puntos representan las mediciones de potencia realizadas, mientras que la curva es una función de interpolación.

Para evaluar la estabilidad del sensor con el tiempo cada prueba fue realizada con intervalos de una semana y para evaluar la repetibilidad del sensor se realizó una interpolación polinomial sobre la totalidad de los datos.

Los sensores fueron también sometidos a un campo electromagnético con una frecuencia de 2.45 GHz y un potencia de 100 W, estos parámetros son similares a los campos a los cuales serán sometidos durante un tratamiento de hipertermia, los resultados se muestran en la figura 4.

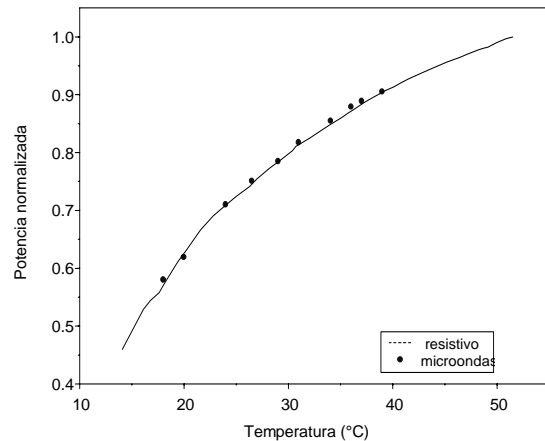


Figura 4. Comparación entre las curvas de calibración obtenidas con calentamiento resistivo y con microondas.

4. CONCLUSIONES

Durante la realización del sensor se encontró un aceite que brinda al sensor un comportamiento estable. Las curvas de sensibilidad, obtenidas en un intervalo de 15 °C a 50 °C, no presentan cambios bruscos de pendiente en su curva de respuesta. Esto hace que el sensor resulte conveniente para realizar mediciones en el intervalo de interés, de 20 °C a 40 °C. Las curvas obtenidas muestran un error por repetibilidad menor al 1%, lo cual indica que el sensor es estable. Los resultados obtenidos con microondas como medio de calentamiento resultan satisfactorios, ya que se logró un error por repetibilidad comparable al obtenido en las curvas con calentamiento resistivo. Por esto, se puede concluir que el sensor desarrollado cumple con el requisito de no resultar afectado de manera considerable por las radiaciones electromagnéticas. En cuanto a la constante de tiempo térmica alcanzada con el sensor, ésta es de 1,9 s.

[¹] Suit, H; Shwayder, M. "Hyperthermia: Potential as an Antitumour Agent", *Cancer*, vol. 34, pp. 122-129, 1974.

[²] Jackson, DA. "Recent progress in monomode fibre-optic sensors", *Meas. Sci. Technol.*, vol 5, pp. 621-638, 1994.

[³] Grattan, KT; Palmer, AW. "Infrared fluorescence decay-time temperature sensor," *Rev Sci Instrum.*, vol. 59 (9), pp. 1784-1787, 1985.

[⁴] Krohn, DA. *Fiber optic sensors. Fundamentals and applications*, Instrument Society of America, 1988.

[⁵] Soares, EA; Dantas, TM. “Bare Fibre Temperature Sensor”, *SPIE Fiber Optic and Laser Sensor VIII*, vol. 1367, pp. 261-265, 1990.

[⁶] Kalinowski, HJ; Baude, E; Polydoro, LA. “Optical Fiber Temperature Sensor for Microwave Hyperthermia”, *Proceedings of the IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference*. Vol. 1, pp. 15-18. 1997.