



**CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.**

Convertidor dinámico de imagen de IR a visible de silicio dopado con Er.

Presenta:

M. en C. Jaime Alberto Sandoval González

Asesor:

Dr. Gonzalo Páez Padilla

Como requisito para obtener el grado de

Doctor en Ciencias (Ópticas)

León, Guanajuato, México, Enero 2005

ÍNDICE

CAPÍTULO I Introducción	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Introducción	3
CAPÍTULO II Modelo térmico	10
2.1 Resultados Numéricos	13
2.2 Convertidor de IR a visible	19
2.3 Conclusiones parciales	20
CAPÍTULO III Caracterización de fluorescencia radial	22
3.1 Medición de la razón de intensidades en dirección radial	25
3.2 Conclusiones parciales	29
CAPÍTULO IV Respuesta térmica experimental	30
4.1 Respuesta al escalón e impulso térmico	30
4.2 Imagen térmica en una fibra de vidrio sin sumidero térmico	37
4.3 Imagen térmica en una fibra óptica con sumidero térmico	43
4.4 Imagen térmica en una placa de vidrio con sumidero térmico	51
4.5 Conclusiones parciales	58

CAPÍTULO V Conversión de imagen	60
5.1 Respuesta espacial	61
5.2 Respuesta espacio-temporal	66
5.3 Conclusiones parciales	74
Conclusiones Generales	75

CAPÍTULO I

1.1 Objetivo

Los objetivos generales del presente trabajo de titulación doctoral involucran desarrollar la metodología necesaria para evaluar el comportamiento que puede presentar un convertidor de imagen de IR a visible, en términos de resolución espacio-temporal y de la información de salida que pueda obtenerse. Dicha metodología debe permitir la evaluación posterior de diversos dispositivos en los que parámetros tales como el material y la configuración física, se consideren como variables de entrada.

Así pues, es importante, primero, la confirmación experimental de los resultados de la simulación numérica, sobre el comportamiento del convertidor que se propone, y que fueron obtenidos con anterioridad¹⁻⁴. En segundo término, es de sumo interés para nosotros lograr la conversión de una imagen térmica en una imagen visible.

De forma más específica, se presentan a continuación los objetivos particulares que componen la conformación de dicha metodología:

- Desarrollo de un modelo para determinar el comportamiento térmico espacial y temporal de una fibra óptica al ser sometida a un estímulo térmico.

- Caracterización de la fluorescencia radial de una fibra dopada con Erblio y bombeada en el infrarrojo cercano (800 nm).
- Caracterización experimental del comportamiento térmico espacial y temporal de una fibra óptica al ser sometida a un estímulo térmico.
- Evaluación de diferentes geometrías en el elemento a ser estimulado térmicamente.
- Conversión de imagen térmica en imagen visible.

1.2 Introducción

En la actualidad existen numerosos dispositivos cuya finalidad es la de obtener imágenes en el infrarrojo ya sea por medio de la conversión de radiación infrarroja (μm) en luz visible (nm), o por el empleo de elementos sensibles a dicha longitud de onda. Tales dispositivos son empleados, entre otras cosas, para la generación de termografías o imágenes térmicas.

Desafortunadamente, los equipos comerciales actuales son sumamente costosos y complejos, son equipos que incluso pueden estar restringidos a la venta al público y que requieren de electrónica avanzada y a menudo de sistemas de enfriamiento criogénico⁵. Nuestra propuesta para hacer frente a tales inconvenientes consiste en la implementación de un dispositivo convertidor de imagen de IR a visible de bajo costo y baja complejidad. El dispositivo posee un elemento sensor continuo. Esto elimina la necesidad de contar con miles de elementos individuales, con sus múltiples conexiones, que suponen elevados costos de diseño y manufactura. Además, el convertidor es no-enfriado, evitando así los costos de los sistemas auxiliares criogénicos.

El convertidor propuesto, se basa en un fenómeno ya conocido y documentado⁶⁻⁸, consistente en la variación de la emisión de fluorescencia generada por los iones de Erblio, presentes como dopante en fibra de sílica, al ser irradiados mediante bombeo de luz en el infrarrojo cercano (800 nm).

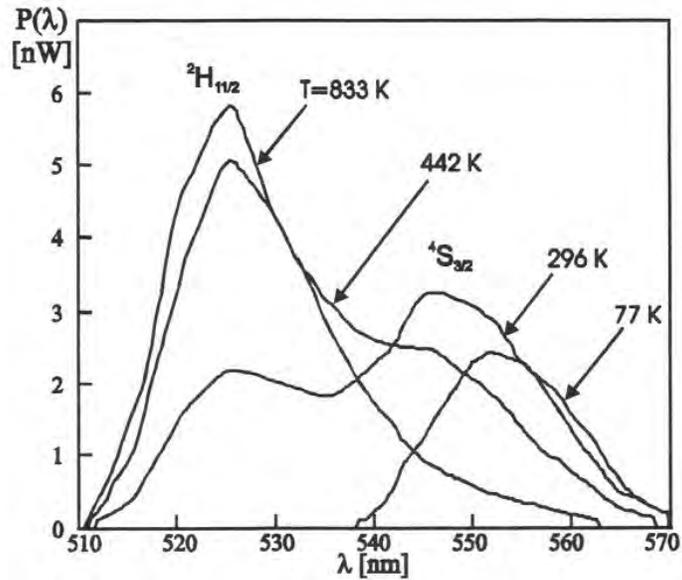


Figura 1.1 Espectro de fluorescencia de la sílica dopada con Er⁺³
 fuente: E. Maurice, et al., Appl. Opt. 34, 4196-4199 (1995).

El espectro de emisión puede apreciarse en la Figura 1.1, donde es posible observar como la intensidad de las bandas centradas alrededor de los 532 nm y 550 nm presenta una fluctuación en su valor con respecto a la temperatura. Así, mientras la banda cercana a los 532 nm incrementa su valor de intensidad a medida que la temperatura crece, la banda cercana a los 550 nm, lo decremента.

Así, la intensidad en la emisión de la radiación de fluorescencia resulta dependiente de la temperatura de la matriz (la sílica en este caso) en la que los iones de erbio se encuentran depositados. La Figura 1.3 muestra el diagrama de energía para las transiciones presentes en el proceso de estimulación y emisión. El proceso es llamado “emisión por absorción de estado excitado”. En él, un fotón del infrarrojo cercano (800nm) es absorbido en el nivel ⁴I_{15/2} poblando con ello el

nivel $^4I_{9/2}$. Desde este último nivel, se presenta una transición no radiativa hasta el nivel $^4I_{13/2}$, nivel que una vez más absorbe un fotón a 800nm. Esta segunda absorción se hace entonces en un nivel ya excitado (de allí el nombre del proceso) lo que permite alcanzar niveles energéticos aún superiores como los correspondientes a $^2H_{11/2}$ y $^4S_{3/2}$ desde donde ocurren transiciones radiativas hasta el estado base más energéticas, correspondientes a una longitud de onda en el visible (550 nm).

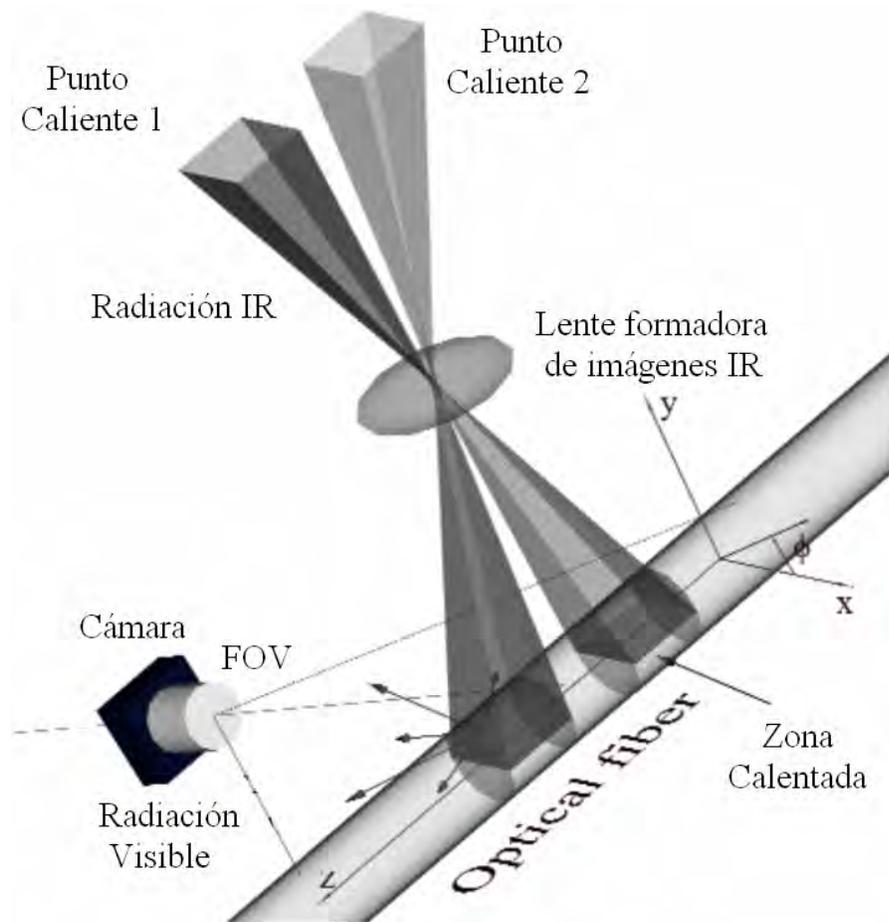


Figura 1.2 Principio de operación del convertidor IR-visible

Además, se ha encontrado que la razón entre las intensidades $I_{532/550}$ es lineal para un buen intervalo de temperaturas, lo que permite la caracterización, diseño e

implementación de sensores de temperatura enteramente ópticos⁹⁻¹². En ellos, sólo basta conocer la razón de intensidades para encontrar la temperatura a la que se encuentra, por ejemplo, una fibra óptica dopada con erbio y bombeada con luz del cercano infrarrojo.

El concepto del convertidor de imágenes, a diferencia de otros convertidores propuestos en la literatura¹³⁻²⁵, de IR a visible radica en el mismo fenómeno ya descrito. La idea consiste aprovechar el fenómeno de emisión de fluorescencia como función de la temperatura en una especie de sensor distribuido de temperatura. La Figura 1.2 muestra una fibra óptica dopada con Erblio sobre la cual se forma la imagen térmica de dos puntos calientes.

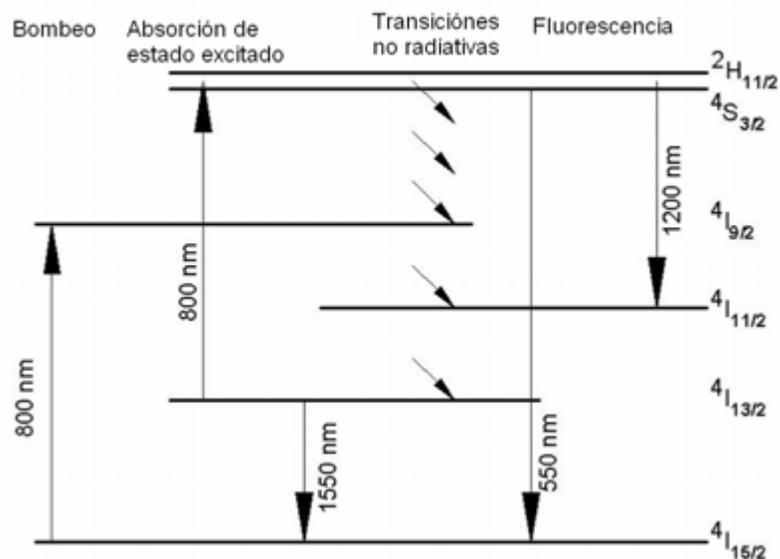


Figura 1.3 Transiciones energéticas en la sílica dopada con Er³⁺

Source: E. Maurice, et al., Appl. Opt. 34, 4196-4199 (1995).

La región irradiada sufrirá un cambio en su temperatura local debido a la absorción de energía térmica. Debido a que la intensidad de emisión en verde de la fibra

depende de la temperatura, la distribución de temperatura, generada por la imagen térmica, originará una distribución de emisión de fluorescencia local diferente para cada región de la fibra. De esta manera, la información de la imagen térmica proyectada sobre la fibra puede ser recuperada en la región visible del espectro.

La Figura 1.4 muestra una posible configuración para un convertidor de imágenes en IR a visible. El arreglo consiste en un conjunto ordenado de fibras ópticas dopadas con Erblio y que son bombeadas con radiación del infrarrojo cercano (800 nm). La disposición de las fibras permite la creación de un detector plano en el que es posible formar imagen térmica bidimensional.

Las fibras se encuentran colocadas sobre un sumidero térmico a temperatura ambiente que tiene el propósito de retirar el calor excedente una vez terminada una "exposición" del detector a radiación infrarroja. Por último, al ser la fibra un detector continuo, es preciso introducir una máscara entre el plano objeto y el plano imagen para asegurar que la radiación en IR y fluorescencia en visible serán absorbida y emitida en una misma región de la fibra.

Es importante recalcar que el convertidor propuesto puede ser modificado sustancialmente al cambiarse parámetros como el tipo de material empleado para realizar la conversión, o la configuración geométrica del elemento sensor. Por este motivo resulta primordial desarrollar una metodología que permita evaluar el desempeño del dispositivo para diferentes escenarios. Así pues, no es nuestro

interés proponer un “único dispositivo convertidor”, sino más bien establecer los lineamientos a seguir para la evaluación de un buen número de configuraciones posibles. De ahora en adelante, al referirnos a “el convertidor” debe entenderse que nos referimos a “el convertidor en turno que se desee evaluar”.

Así pues, para determinar las características del elemento sensor del convertidor, es preciso conocer el comportamiento térmico que tendría una fibra óptica al ser irradiada en una región determinada.

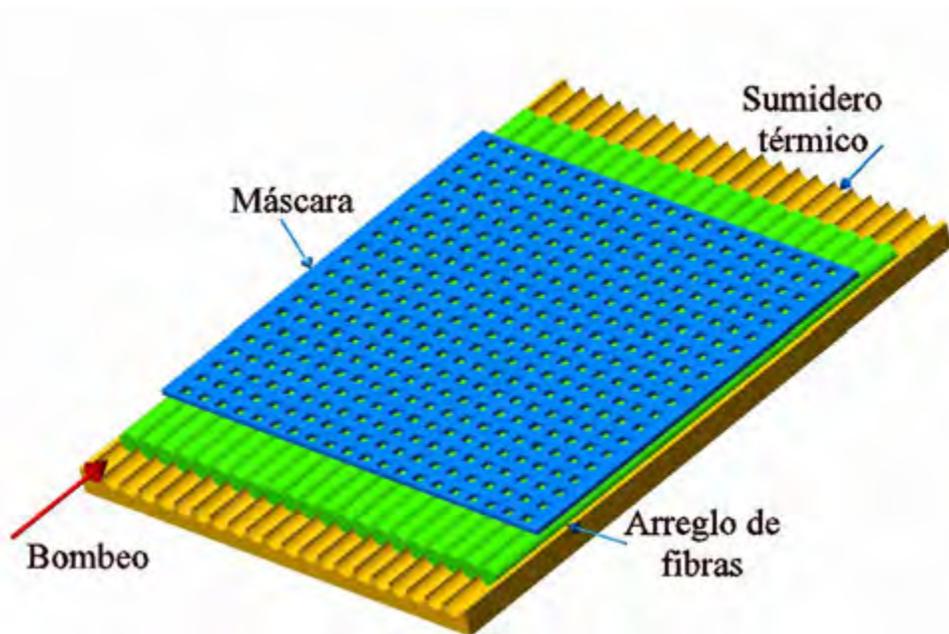


Figura 1.4 Elemento convertidor del dispositivo propuesto

Es de sumo interés conocer el aspecto que tendrá el perfil de la distribución de temperaturas, alrededor del punto irradiado, a lo largo de la fibra, y que por efectos de la difusión térmica, en términos reales, constituye la resolución espacial que el detector tendría. Otro valor importante es aquel de los tiempos en los que es posible calentar y enfriar la fibra, pues tal velocidad de respuesta temporal puede

determinar la capacidad del detector para convertir imágenes en el tiempo con su posible aplicación en video.

El segundo capítulo de este trabajo trata la modelación de la transferencia de calor hacia la fibra y se delinearán las primeras características térmicas del convertidor.

El tercer capítulo se avoca a la caracterización de la fluorescencia radial de la fibra. Esto es importante pues permite conocer la forma en la que la emisión en visible depende de la temperatura, y con ello logra efectuar la conversión de imagen en términos cuantitativos.

El cuarto capítulo trata de la verificación experimental de los resultados del comportamiento térmico obtenidos mediante la simulación numérica previa.

En el quinto capítulo se profundiza sobre la conversión de imagen térmica a visible. Se habla sobre los experimentos llevados a cabo para la realización de la conversión y se muestran los resultados en términos de resolución espacial y respuesta temporal del convertidor.

CAPÍTULO II

Modelo térmico

Ante la necesidad de conocer el comportamiento térmico de una fibra óptica surge el interés de desarrollar un modelo que logre predecir la transferencia de calor en forma radiativa hacia una fibra óptica.

El modelo desarrollado en este trabajo involucra la transferencia del calor que de manera radiativa y conductiva, y en forma transitoria y tridimensional, una fibra óptica recibe y difunde respectivamente al ser irradiada en una determinada zona²⁶⁻²⁸.

Como lo muestra la Figura 2.1, la irradiación se supone incidente en dos zonas de la fibra separadas por una cierta distancia. La absorción de la radiación supone un incremento en la temperatura de la superficie donde se absorbe y un subsiguiente calentamiento gradual en todas direcciones.

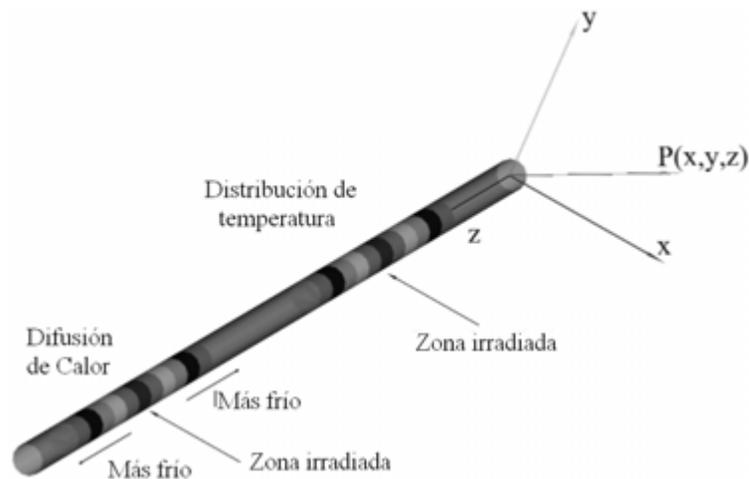


Figura 2.1 Zonas de irradiación incidente sobre la fibra

La energía se difunde hacia abajo y hacia los lados (en dirección del eje óptico, o eje z en este caso) gracias a un proceso de transferencia por conducción. Tal difusión define el perfil de temperaturas y por ende la separación mínima a la que pueden estar dos zonas irradiadas para que éstas puedan resolverse. Por tal motivo, dicho perfil delimita la resolución espacial del convertidor.

Por otra parte, el tiempo necesario para calentar y enfriar una región cualquiera de la fibra determina la velocidad de respuesta del proceso térmico. Dicha velocidad puede determinar el uso del convertidor en aplicaciones de video.

La ecuación que debe resolverse (Ec. 2.1) es pues, aquella que permite conocer la temperatura como función de la posición tridimensional (coordenadas cilíndricas en este caso) y del tiempo, y que involucra fuentes de calor dependientes a su vez de la posición y del tiempo:

$$c_e \rho \frac{\partial T(r, \phi, z, t)}{\partial t} = k \nabla^2 T(r, \phi, z, t) - \Phi_s(r, \phi, z, t) \quad . \quad (2.1)$$

Aquí,

- c_e = Calor específico [J/(kg K)]
- ρ = densidad [kg/m³]
- T = temperatura [K]
- (r, ϕ, z) = coordenadas cilíndricas
- t = tiempo [s]

k = conductividad térmica [W/(m K)]

$F_s(\rho, \phi, z, t)$ = Densidad de potencia absorbida por unidad de superficie en la fibra con dependencia temporal y espacial [W/m²].

Para resolver la ecuación se seleccionó el método numérico de las diferencias finitas²⁹. En él, un sólido (la fibra en este caso) se divide en pequeños elementos (nodos) y se analiza la transferencia de calor entre ellos. Como se muestra en la Figura 2.2, cada elemento es tratado como una esfera con una cierta capacitancia térmica que, a su vez, se encuentra conectado con los elementos adyacentes mediante barras que presentan una cierta resistencia a la transferencia de calor.

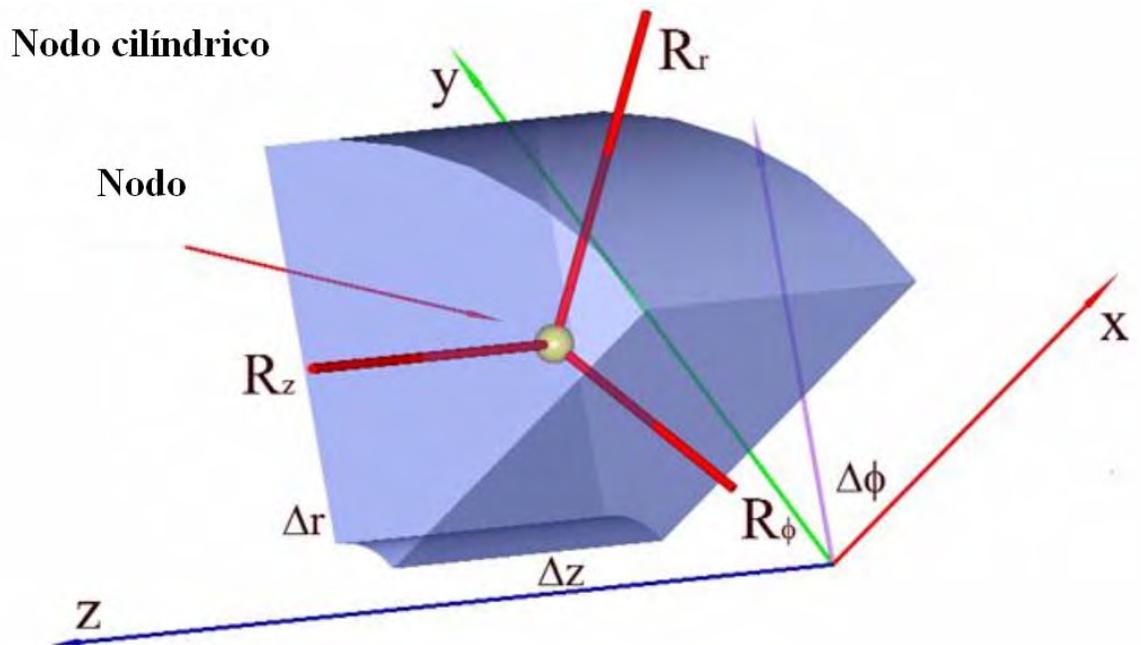


Figura 2.2 La técnica de las diferencias finitas dividen un sólido tridimensional en elementos de volumen denotados como nodos

2.1 Resultados Numéricos

Los resultados de la simulación se presentan para estímulos térmicos correspondientes a un escalón y a un pulso de irradiación sobre dos zonas de la fibra.

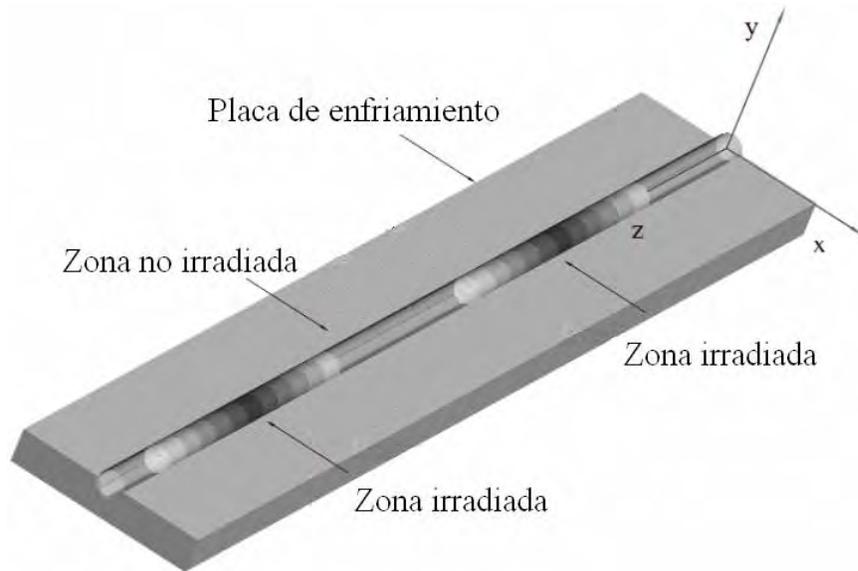


Figura 2.3 Para mejorar la respuesta a un impulso térmico, se introduce un sumidero térmico para remover el calor excedente.

La fibra irradiada (Figura 2.3) se supone en contacto con un sumidero térmico ideal a temperatura ambiente ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$), y no se consideran pérdidas de temperatura por convección. La fibra simulada es una fibra de comunicaciones comercial, dopada con Erblio, que está compuesta principalmente por SiO_2 , tiene un diámetro exterior (cladding) de $125\text{ }\mu\text{m}$ y un diámetro del núcleo de $3\text{ }\mu\text{m}$.

La irradiación en cada zona de la fibra es de 1 W/m^2 y la zona de absorción de la fibra en cada región es igual al área proyectada correspondiente a una superficie cuadrada cuyo lado es igual al diámetro de la fibra.

La primera serie de resultados de la simulación concierne a irradiación constante, esto es, a un escalón de irradiación. La figura 2.4 muestra el incremento en la temperatura promedio de la sección transversal del núcleo de la fibra como función de la posición a lo largo de la fibra, con el tiempo como parámetro.

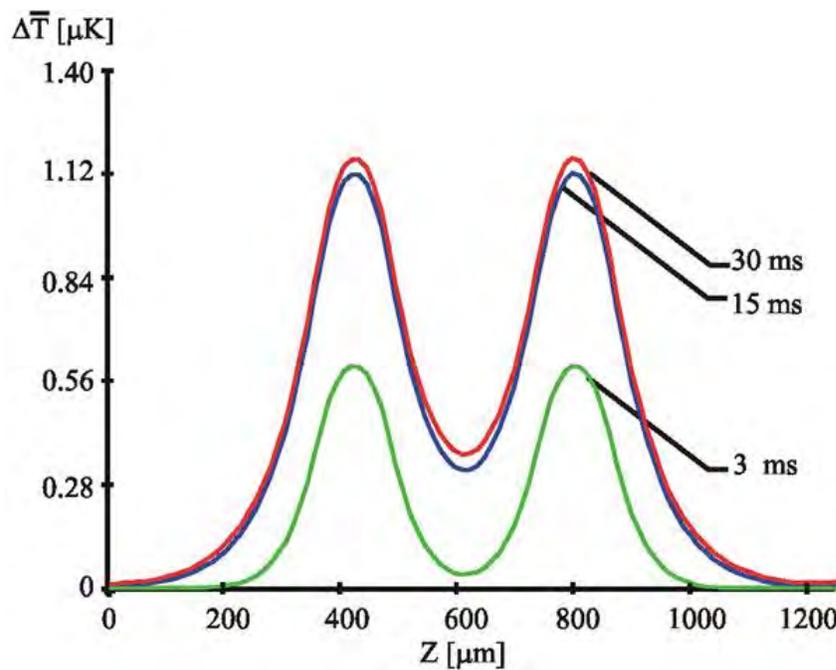


Figura 2.4 Temperatura promedio de la sección transversal del núcleo de la fibra como función de la posición a lo largo de la fibra (eje Z), con el tiempo como parámetro.

La Figura 2.5 indica el incremento en la temperatura promedio de la sección transversal de una zona irradiada de la fibra y de una zona no irradiada como función del tiempo.

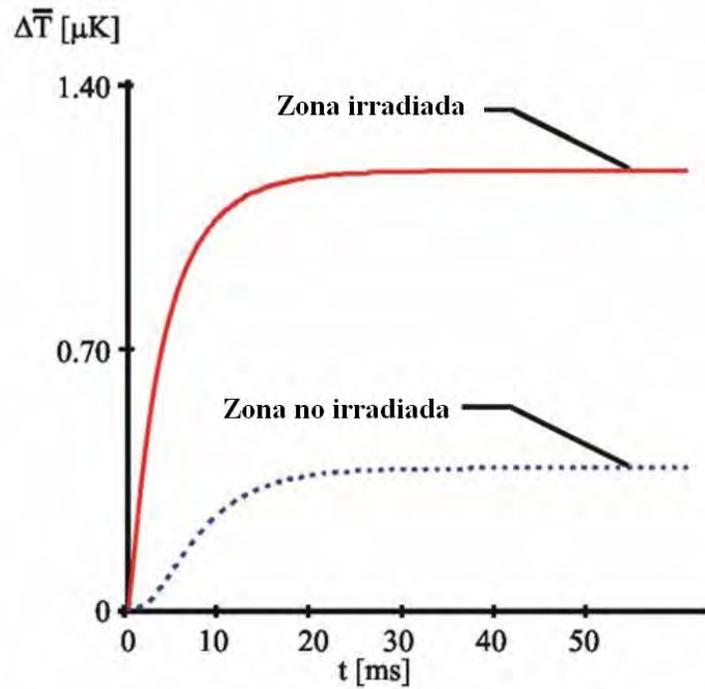


Figura 2.5 Incremento de la temperatura promedio de la sección transversal del núcleo de un píxel irradiado y no irradiado como función del tiempo.

Por otra parte, la segunda serie de figuras muestran la simulación correspondiente a irradiación pulsada, esto es, a un impulso de irradiación. La figura 2.6 muestra el incremento en la temperatura promedio de la sección transversal del núcleo de la fibra como función de la posición a lo largo de la fibra, con el tiempo como parámetro.

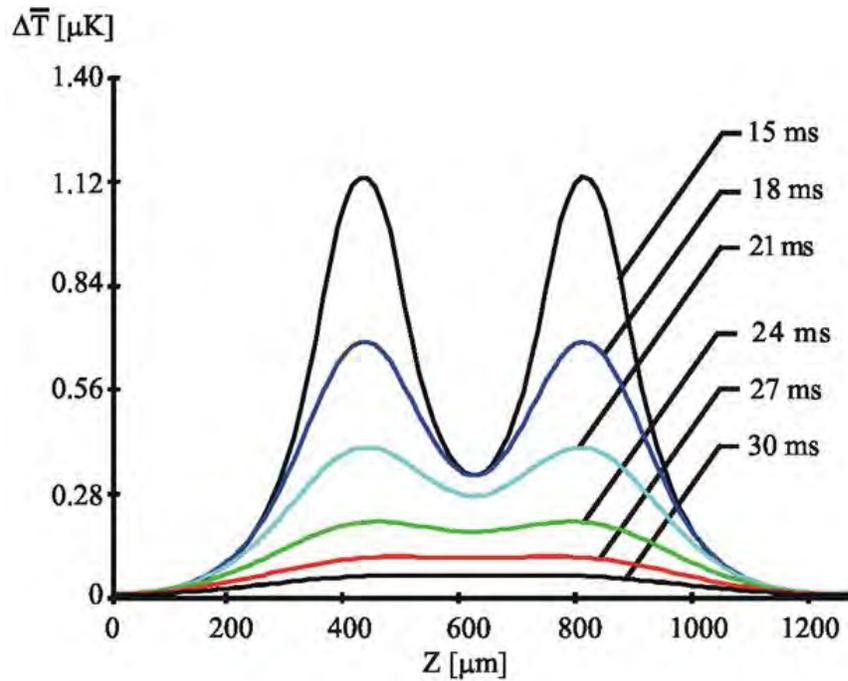


Figura 2.6 Temperatura promedio de la sección transversal del núcleo de la fibra como función de la posición a lo largo de la fibra (eje Z), con el tiempo como parámetro.

La Figura 2.7 indica el incremento en la temperatura promedio de la sección transversal de una zona irradiada de la fibra y de una zona no irradiada como función del tiempo.

De los resultados anteriores se pueden inferir dos datos importantes. El ancho del perfil en la altura media corresponde a $200 \mu\text{m}$. De acuerdo con el criterio de resolución de Rayleigh³⁰, la distancia mínima a la que pueden estar dos picos para que éstos puedan resolverse, siendo que ambos perfiles se intersecan en el 74% del valor pico, es de $245 \mu\text{m}$ (Figura 2.8).

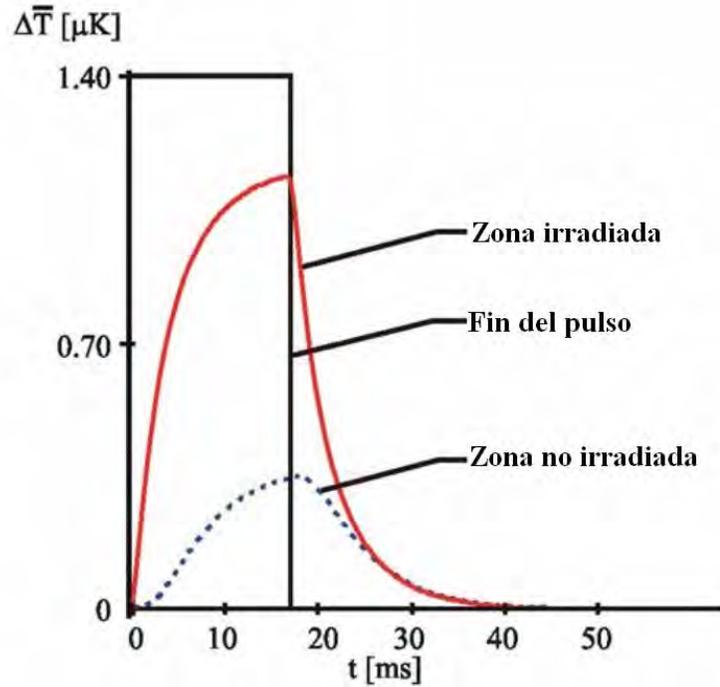


Figura 2.7 Incremento de la temperatura promedio de la sección transversal del núcleo de un píxel irradiado y no irradiado como función del tiempo.

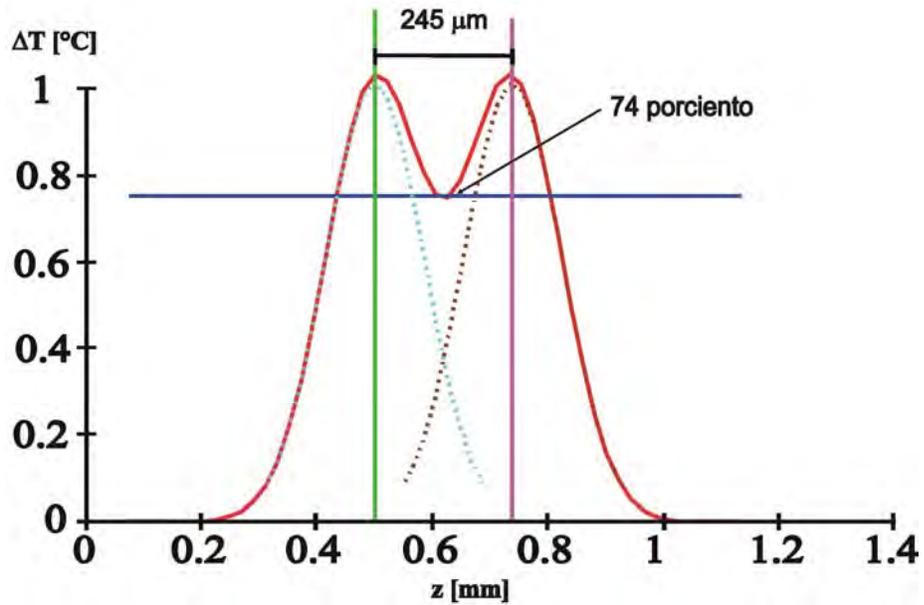


Figura 2.8 El ancho del perfil a media altura es de 200 μm . Usando el criterio de resolución de Rayleigh la distancia mínima entre picos es de 245 μm .

Otro dato importante es el de los tiempos de levantamiento y decaimiento térmico, en el proceso de calentamiento y enfriamiento de la fibra. La figura 2.9 indica las constantes de tiempo del sistema, que su vez están íntimamente relacionadas con el coeficiente total de calor del proceso. Una vez conociendo dicho coeficiente (que no cambia si las condiciones de la transferencia se mantienen) es posible diseñar la fibra (en función de sus características geométricas principalmente) para modificar la constante de tiempo, y con ello, la velocidad del sistema. Así, mientras en esta fibra en particular, una imagen puede ser escrita y borrada en aproximadamente 40 ms, este tiempo puede ser diseñado para satisfacer requerimientos determinados.

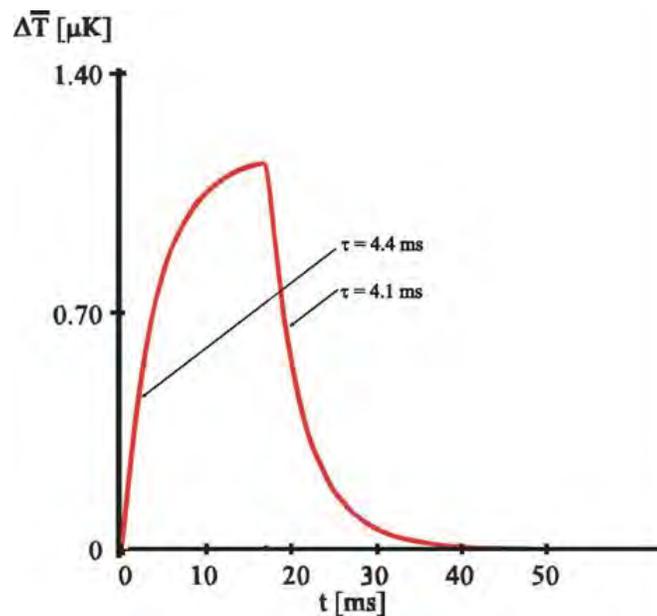


Figura 2.9 La imagen térmica puede escribirse y borrarse en 40ms.

2.2 Convertidor IR-visible

Una vez que se ha predicho el comportamiento térmico de la fibra óptica, resulta útil enfocar la atención en la manera en la que la conversión de la información en el infrarrojo al visible tomará lugar.

La Figura 2.10 muestra una versión del sistema propuesto de conversión de imágenes en IR a imágenes en visible.

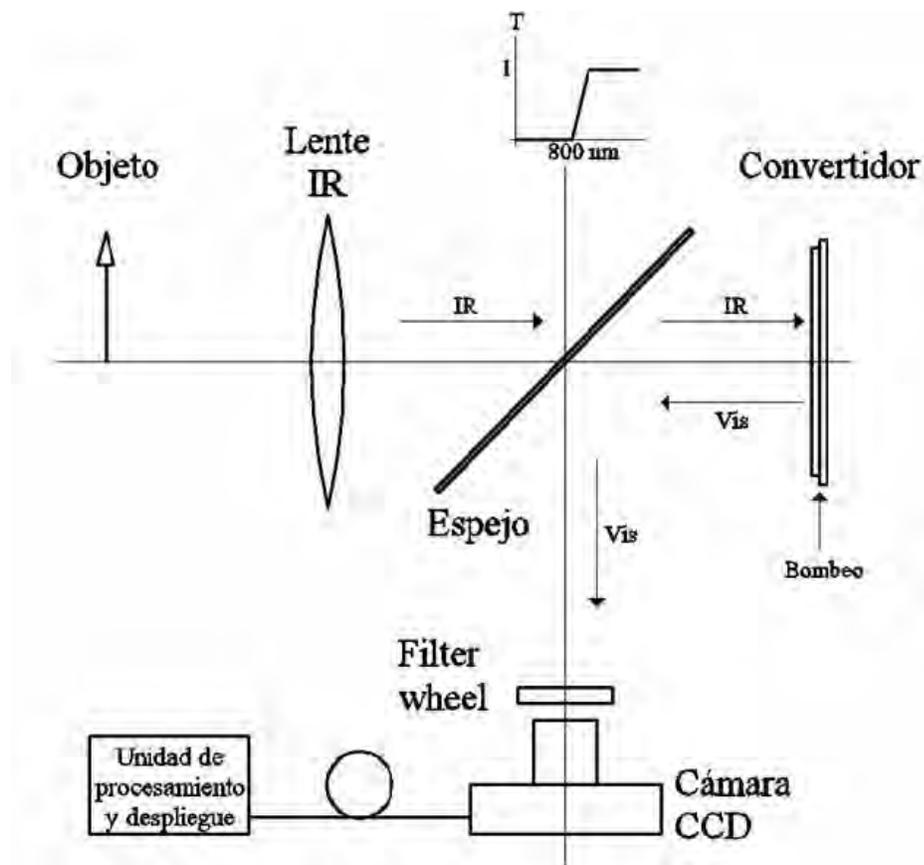


Figura 2.10 Configuración propuesta para el convertidor IR-visible

El dispositivo consta en primer término de un sistema de formación de imagen térmica sobre elemento de conversión. Tal sistema consta principalmente de una lente para IR y un espejo frío a 45° que permita el paso de la luz infrarroja pero refleje la radiación en visible. De esta manera, la información en el visible proveniente del elemento de conversión será desviada hacia una cámara CCD en visible que, con la ayuda de sendos filtros en bandas seleccionadas (532 nm y 550nm por ejemplo), logre capturar la información necesaria para generar la señal de la razón de intensidades, y con ello, obtener resultados sobre la temperatura del convertidor, y por ende, información sobre la temperatura del plano objeto.

Para conocer en forma correcta la temperatura del plano focal y con ello, la del plano objeto, es necesario caracterizar la fluorescencia medida en forma radial en función de la temperatura y de la posición a lo largo de la fibra. Lo anterior permitirá encontrar la relación que contenga la dependencia de la emisión en visible con la temperatura.

El siguiente capítulo trata con la caracterización de la radiación de fluorescencia media en la fibra en dirección radial.

2.3 Conclusiones parciales

a) Se desarrolló un modelo de transferencia de calor para determinar la distribución temporal y espacial de la temperatura en la fibra.

- b) La inclusión del sumidero térmico mejora la resolución espacial y temporal del dispositivo propuesto.

- c) La distancia mínima entre picos de las regiones irradiadas debe ser, al menos, igual a 2 veces el diámetro de la fibra.

- d) A temperatura ambiente, una imagen térmica puede ser escrita y borrada en 40 ms.

CAPÍTULO III

Caracterización de Fluorescencia Radial

Una vez conocido el resultado de la simulación del comportamiento térmico de la fibra, el paso a seguir consiste en caracterizar la emisión de fluorescencia como función de la temperatura y la posición a lo largo de la fibra. De esta manera, será posible obtener una relación que haga explícita la dependencia de la señal de visible del convertidor, es decir, la emisión de fluorescencia en verde, con la señal en infrarrojo, esto es, la temperatura del plano focal.

La Figura 3.1 muestra una fotografía microscópica de la vista lateral de una fibra óptica comercial de comunicaciones dopada con Erbio. Como puede apreciarse, únicamente el núcleo de 3μ de diámetro emite fluorescencia. La reducida dimensión del núcleo emisor involucra una serie de dificultades al momento de tratar de medir la intensidad de radiación en cada una de las bandas.

Para caracterizar la emisión de fluorescencia se montó el arreglo experimental que se ilustra en la Figura 3.2. Se empleó una cámara CCD en visible enfriada termoeléctricamente, de 14 bits de profundidad para lograr tomar fotografías digitales de la vista lateral (dirección radial) de la fibra. Se utilizó un arreglo óptico compuesto por una lente cilíndrica (para amplificar la imagen de la fibra sólo en la dirección radial), y una lente convencional para formar la imagen de la fibra amplificada sobre el detector de la cámara.

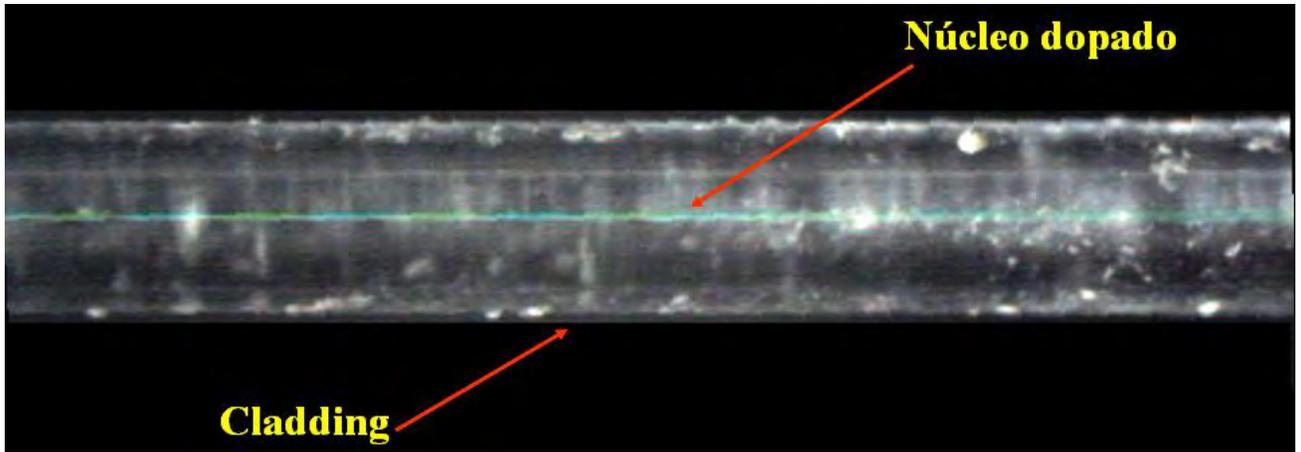


Figura 3.1 Fibra cuyo núcleo es iluminado por fluorescencia en verde por iones de Erbio, gracias al bombeo en el infrarrojo cercano.

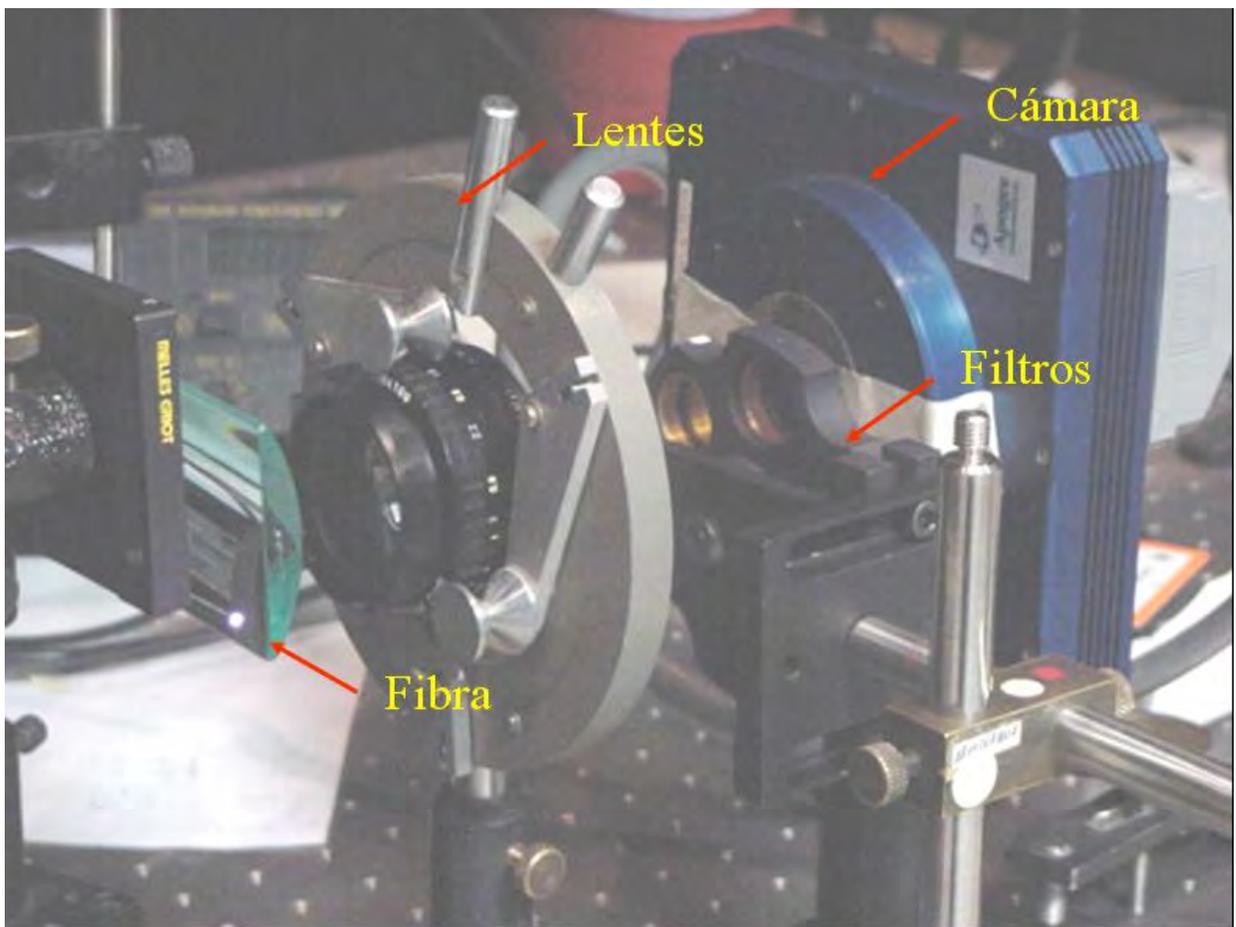


Figura 3.2 En la caracterización de la fluorescencia radial se emplea una cámara termo-enfriada de 14 bits.

Así mismo, se echó mano de una rueda de filtros para seleccionar la banda en la que la fotografía debe tomarse. Los filtros empleados para capturar las imágenes digitales son interferométricos, poseen un ancho de 10 nm, y corresponden a las bandas de mayor sensibilidad al cambio en la razón de intensidades con respecto a la temperatura: 532 nm y 550 nm.

Las imágenes espectrales del núcleo de la fibra al ser vista en forma lateral se presentan en la Figura 3.3.

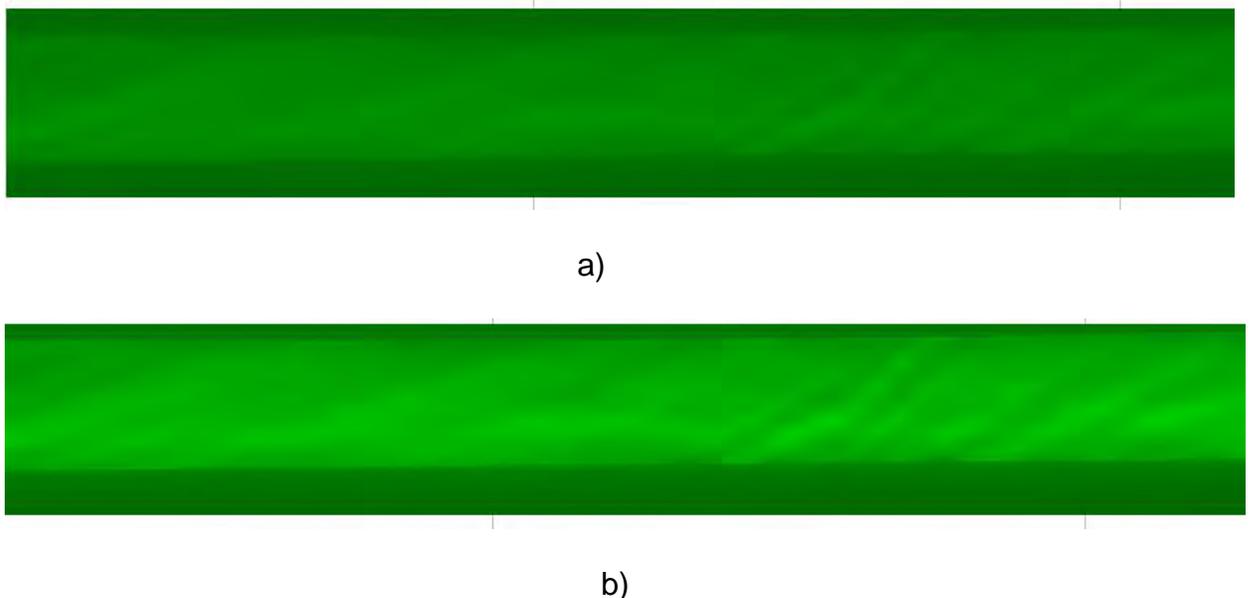


Figura 3.3 Imagen espectral del núcleo de la fibra visto en forma lateral (dirección radial de la fibra). a) Banda de 532 nm. b) Banda en 550 nm.

3.1 Medición de la razón de intensidades en dirección radial

Una vez obtenidas las imágenes en cada banda, éstas deben procesarse digitalmente con el objeto de encontrar la señal de razón de intensidades como función de la posición a lo largo de la fibra para cada temperatura.

La Figura 3.4 muestra la razón de intensidades (532nm/550nm) como función de la posición a lo largo de la fibra para una misma temperatura de 20 °C.

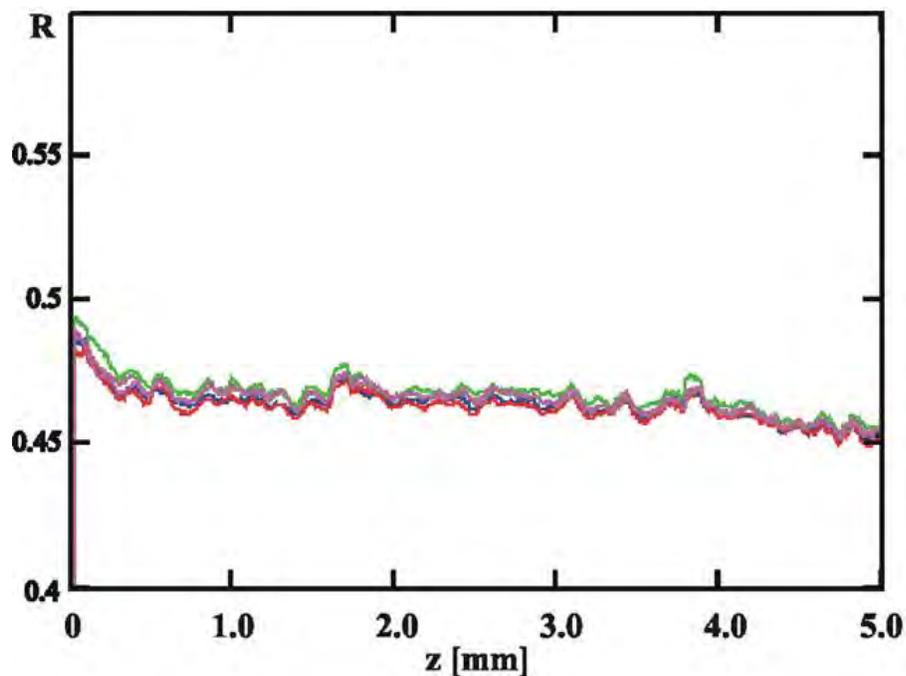


Figura 3.4 Repetitividad en la medición de 5 exposiciones consecutivas
 $T = 20$ °C.

La Figura 3.5 muestra la razón de intensidades (532nm/550nm) como función de la posición a lo largo de la fibra a través de una excursión en la temperatura de toda la fibra de poco más de 10 °C. La fibra se calentó en su totalidad al ponerla

en contacto con la zona caliente de un enfriador termoeléctrico de efecto Peltier. La temperatura fue monitoreada con un termopar con una resolución de tres cifras significativas. Es posible apreciar la no uniformidad en el dopante de la fibra, que ocasiona cierta irregularidad en la razón medida en cada punto de la fibra. La excursión en la temperatura permite por un lado, verificar que dicha irregularidad sólo depende de la fibra (por lo que puede corregirse). Además, dicha excursión proporciona la dependencia con la temperatura de la razón de las intensidades de la radiación por fluorescencia emitida en el visible.

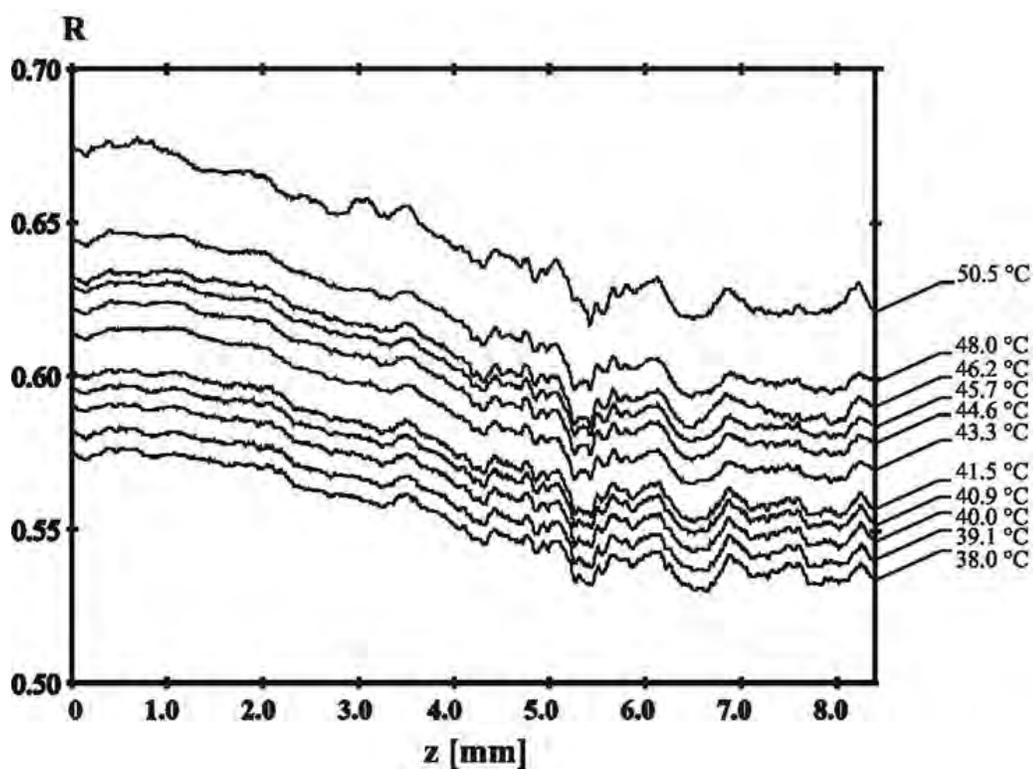


Figura 3.5 Razón de intensidades R (P532/P550) de la fluorescencia radial, medida a lo largo de la fibra para varias temperaturas.

De esta manera, es posible calcular la relación entre la razón de intensidades y la temperatura para cada uno de los puntos en la fibra. La Figura 3.6 señala dicha relación, donde puede apreciarse que todos los píxeles se comportan de manera similar (misma pendiente).

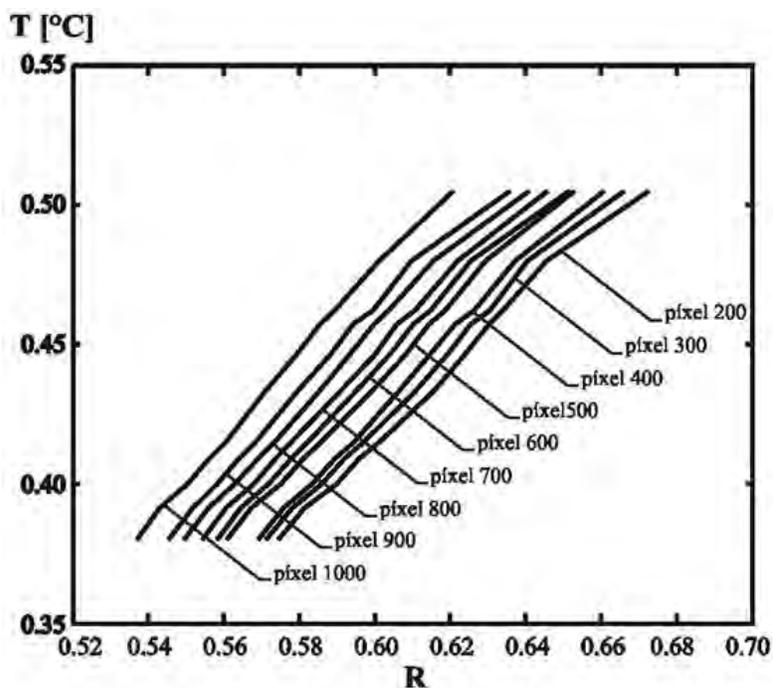


Figura 3.6 La relación entre la temperatura y la razón de intensidades es lineal. Todos los píxeles se comportan en forma similar (misma pendiente).

Lo anterior da lugar a que cada uno de los píxeles pueda ser corregido por software en términos de la inhomogeneidad en el dopante. Así, como se puede ver en la Figura 3.7, es posible generar la curva de corrección de cada píxel (Ec. 3.1) para lo que sólo son necesarios dos valores: la pendiente del píxel y su

ordenada al origen. Estos valores son calculados para cada píxel y sus valores son presentados en la Figura 3.8.

$$T_p = T_{O(p)} + M_{(p)} \cdot R \quad . \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Ya que se conoce la forma de la dependencia de la razón de intensidades con la temperatura, resulta evidente la necesidad de comprobar experimentalmente los resultados obtenidos mediante la simulación numérica.

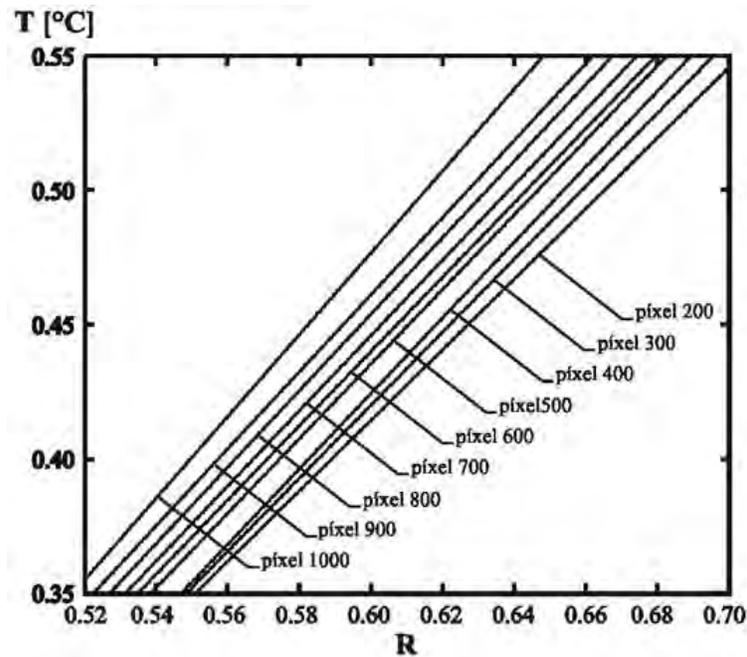


Figura 3.7 Cada píxel de la CCD debe corregirse con el fin de obtener la temperatura correcta a partir de la razón de intensidad.

El siguiente capítulo trata de los experimentos que se llevaron a cabo para la verificación de las propiedades térmicas de la fibra predichas.

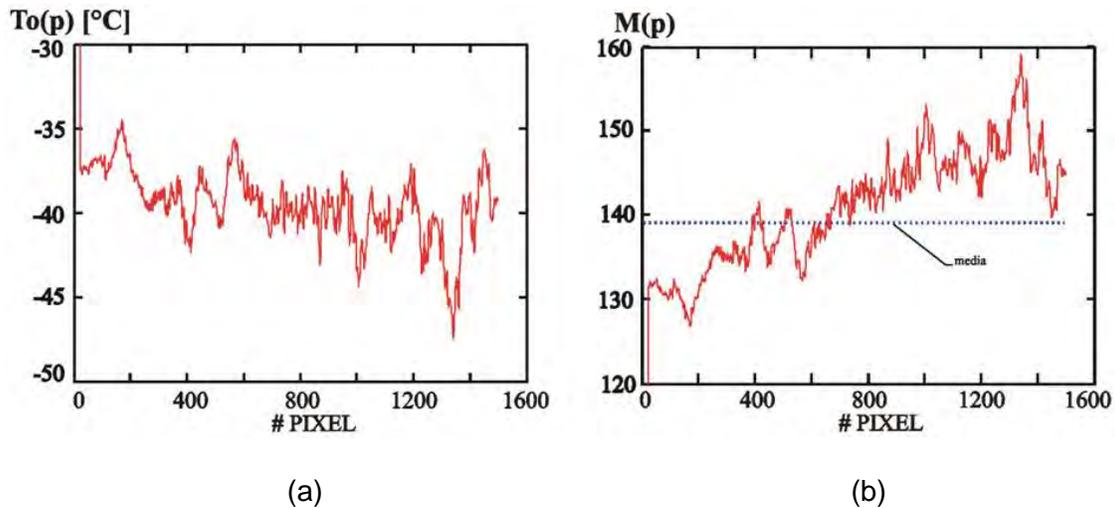


Figura 3.8 Los coeficientes, ordenada al origen (a) y pendiente (b) para la curva de corrección son calculados para cada píxel.

3.2 Conclusiones parciales

a) Montamos un experimento, empleando una cámara CCD termo-enfriada, para medir la distribución de radiación de fluorescencia radial a lo largo de una fibra en presencia de un estímulo térmico.

b) Encontramos la relación entre la temperatura y la razón de intensidades de la fluorescencia radial.

c) Establecimos el mecanismo de corrección de la no uniformidad en el dopante de la fibra.

CAPÍTULO IV

Respuesta térmica experimental

Los resultados del comportamiento térmico obtenidos en la simulación deben ser verificados experimentalmente antes de intentar la conversión de imagen térmica en visible. El presente capítulo trata de los experimentos que se efectuaron con el fin de comprobar el comportamiento predicho.

4.1 Respuesta espacial al escalón e impulso térmico

La primera caracterización térmica de la fibra se efectuó tratando de encontrar la respuesta de la fibra a un escalón y a un impulso térmico.

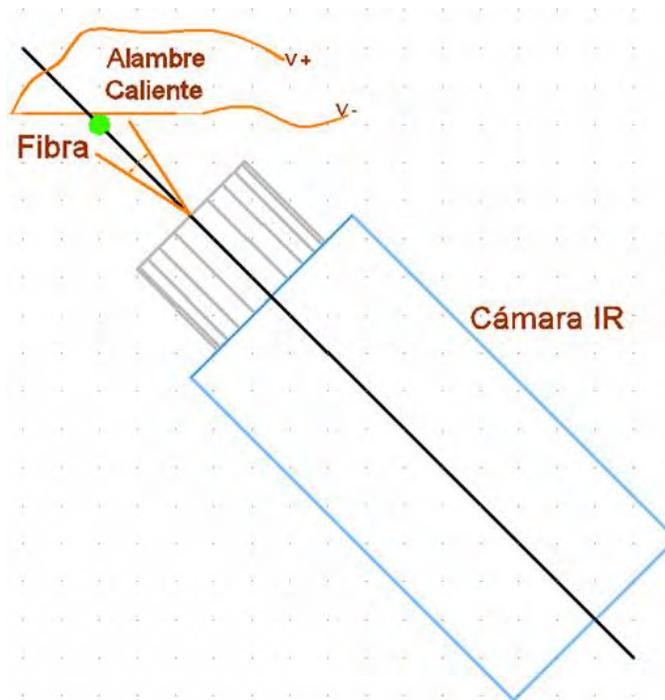


Figura 4.1 La fibra es calentada mediante el contacto en un solo punto con un alambre caliente. El comportamiento temporal y espacial térmico es capturado mediante una cámara IR de 14 bits.

La fuente de calor en este primer caso fue un alambre de cobre en contacto con una fuente de calor. Así, el alambre funge como transmisor del calor desde una fuente hasta la fibra. La razón más importante para el empleo del alambre es que, al ser cilíndrico, prácticamente toca a la fibra en un sólo punto matemático, transfiriendo el calor en una sola zona (tal y como la simulación supone).

Las figuras 4.1 y 4.2 muestran el esquema del arreglo experimental empleado para esta primera caracterización. El comportamiento térmico espacial y temporal de la fibra es capturado con una cámara CCD sensible en la región del infrarrojo que va de 8 a 10 micras. La cámara posee una profundidad de 14 bits.

El experimento consiste en poner en contacto a la fibra con el alambre caliente al mismo tiempo que se captura con la cámara de IR la termografía que contiene los datos sobre la temperatura de la fibra.

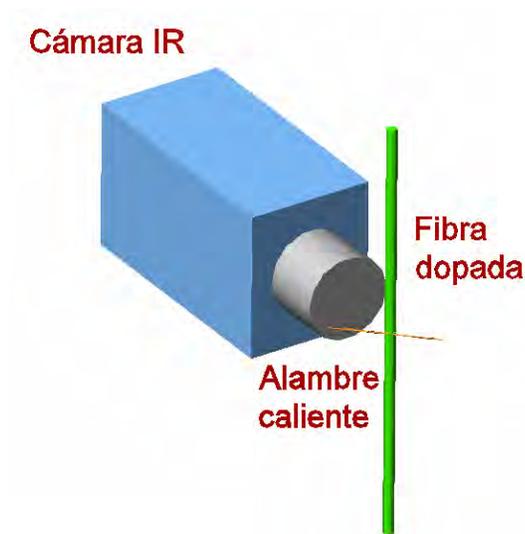


Figura 4.2 Arreglo experimental para la caracterización térmica.

La Figura 4.3 muestra la termografía de la fibra en el momento en la que ésta se encuentra en estado estable, es decir, la temperatura máxima en la fibra ha sido ya alcanzada y la transferencia de calor se ha equilibrado entre lo que se transfiere por conducción hacia la fibra desde el alambre, y lo que se pierde por convección natural. El calor suministrado desde el alambre hacia la fibra es $Q = 7.357 \times 10^{-6} \text{ J}$

El campo de vista de la cámara es de $760 \times 640 \mu\text{m}$. En la termografía puede apreciarse la información sobre la temperatura de la fibra en función de la posición a lo largo de su eje óptico (eje z).

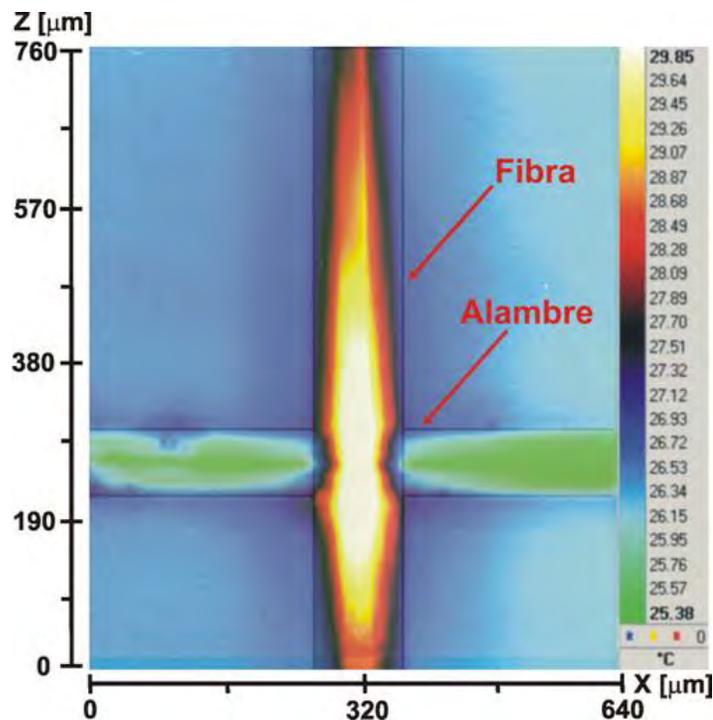


Figura 4.3 Termografía de la fibra irradiada. El alambre de cobre se encuentra en contacto con una fuente de calor.

También puede verse el alambre (elemento horizontal de la imagen) a una temperatura aparentemente menor. Esto se debe a que el alambre no se encuentra enfocado en la termografía y, por lo tanto, la información radiométrica que la cámara recibe del alambre no es real. Las coloraciones en el fondo de la imagen corresponden a la temperatura de la capa de aire que se encuentra en el plano objeto.

De la termografía anterior es posible extraer información valiosa sobre el comportamiento de la fibra. Tal es el caso del perfil de temperatura como función de la posición a lo largo de la fibra.

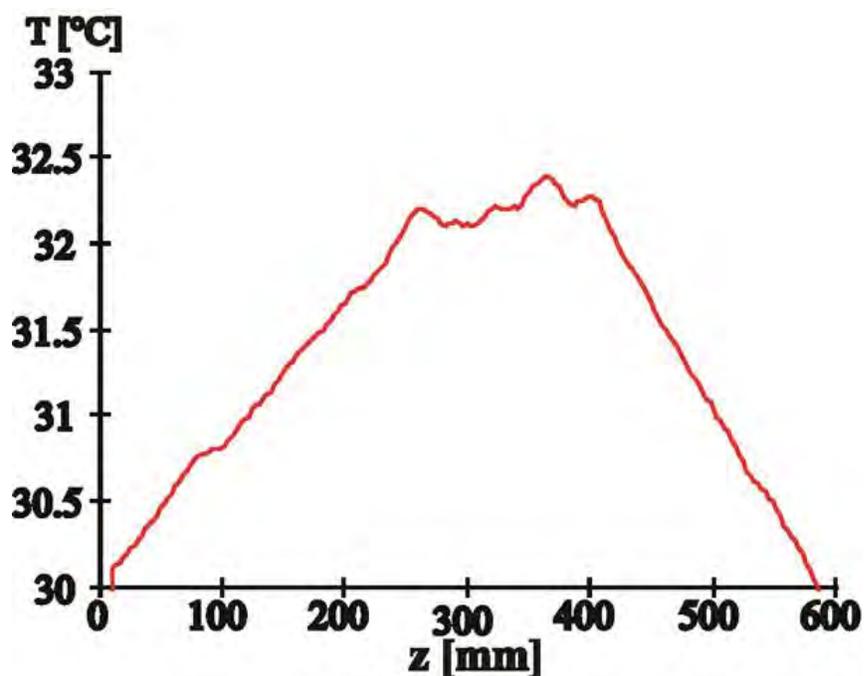


Figura 4.4 Calentamiento conductivo constante. Temperatura en función de la posición a lo largo de la fibra (eje Z). El ancho a media altura del perfil es 390 μ m.

La figura 4.4 muestra dicho perfil. El ancho a altura media del perfil es de $390\ \mu\text{m}$. Al comparar este ancho con el simulado ($200\ \mu\text{m}$), resulta evidente que este resultado, 2 veces mayor, se debe a la carencia de un sumidero térmico que ayude a remover calor.

La cámara de IR permite la adquisición de video termográfico. De tal suerte, es posible extraer de él, la información relacionada con el comportamiento temporal del perfil de temperaturas. La Figura 4.5 ilustra el incremento en la temperatura de la fibra como función de la posición a lo largo de la fibra y con el tiempo como parámetro.

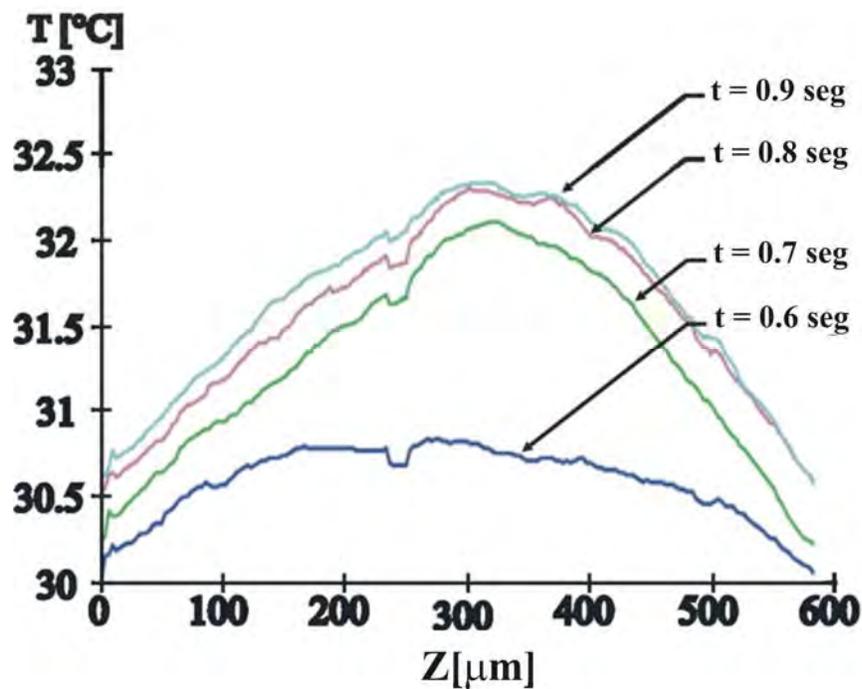


Figura 4.5 Calentamiento conductivo constante. Temperatura en función de la posición a lo largo de la fibra (eje Z), con el tiempo como parámetro.

De igual manera, se determinó la respuesta temporal de la fibra al someterse a calentamiento y enfriamiento súbito (poniendo en contacto y retirando rápidamente al alambre con la fibra). Las constantes de tiempo, correspondientes al levantamiento y extinción al 63.2% del valor pico se muestran en las Figuras 4.6 y 4.7 respectivamente. La variación en casi dos órdenes de magnitud entre la velocidad de respuesta simulada y la experimental se debe, una vez más, a la carencia de un sumidero térmico que ayude a la estabilización entre el calor añadido a la fibra y el calor removido de ésta.

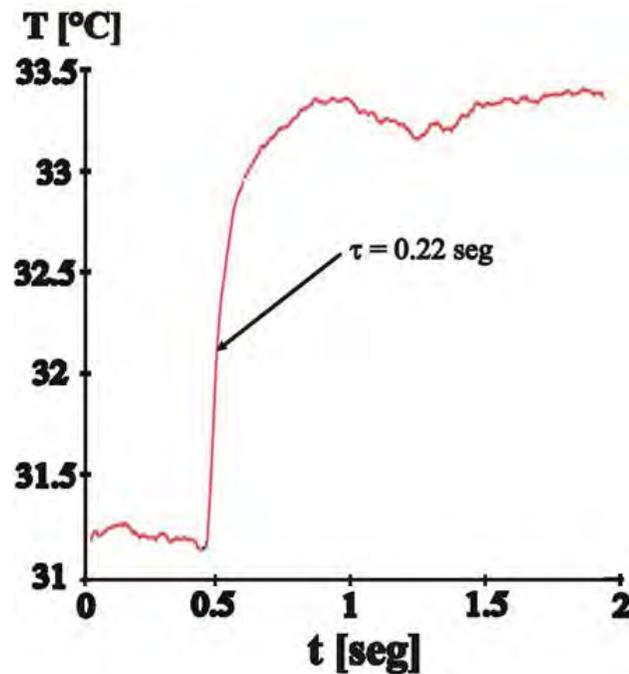


Figura 4.6 Calentamiento conductivo pulsado. Cambio en la temperatura (levantamiento) de un píxel central como función del tiempo.

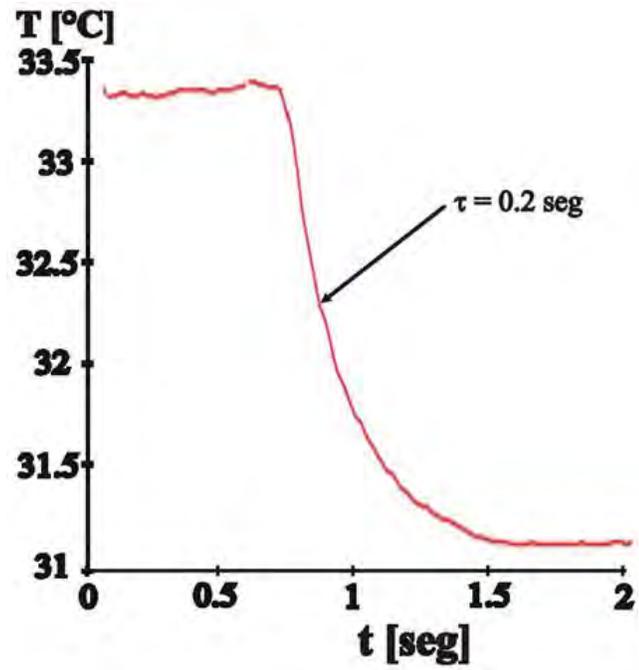


Figura 4.7 Calentamiento conductivo pulsado. Cambio en la temperatura (extinción) de un píxel central como función del tiempo.

4.2 Imagen térmica en una fibra de vidrio sin sumidero térmico

El siguiente paso en el proceso experimental consiste en formar imagen térmica sobre la fibra. La fibra al ser de sílica, presenta muy buena absorción (0.96%) a partir de las 4 micras y hasta las 40 micras. Los picos en la radiación de cuerpo negro a estas longitudes de onda corresponden a temperaturas del cuerpo de 750 K y 75 K respectivamente.

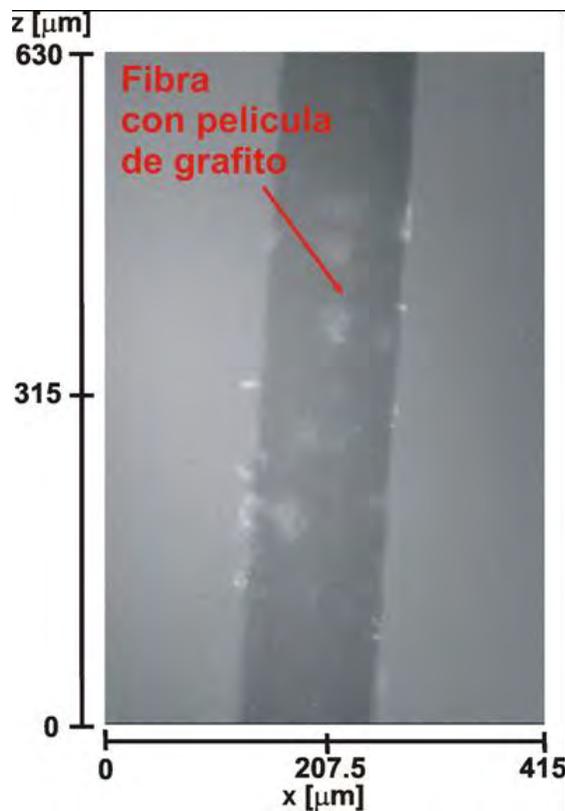


Figura 4.8 Fibra recubierta con película de grafito.

Para extender la región del espectro en la que la fibra lograría absorber se depositó una película de grafito de 1 micra de espesor (10% de transmisión a 632 nm) con la ayuda de la campana de evaporación del laboratorio de películas

delgadas del Centro de Investigaciones en Óptica. La Figura 4.8 muestra una fotografía microscópica de la fibra con su recubrimiento de grafito.

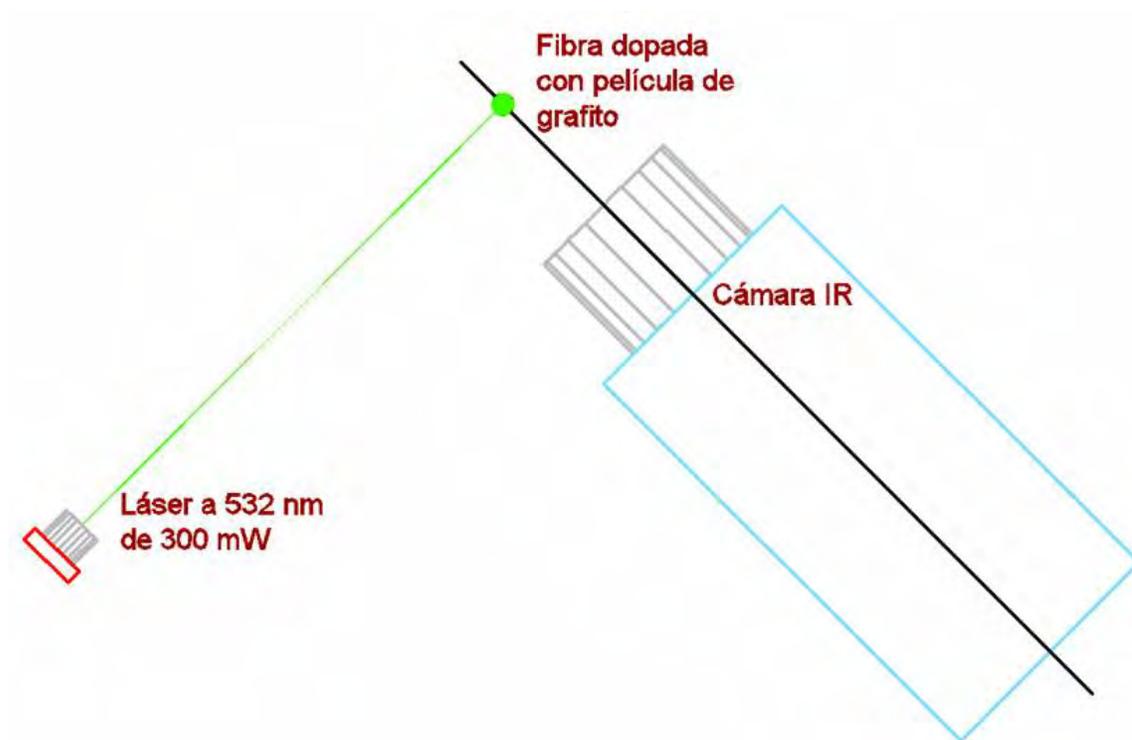


Figura 4.9 La fibra es calentada con un diodo láser de 300 mW a 532nm. Posee una película de grafito para simular la absorción en IR.

El grafito logra extender la zona de absorción de la fibra a la región del visible, con lo que el rango de temperaturas del cuerpo negro que puede detectarse varía sensiblemente hasta los 5000 K sin problemas. Otra de las razones de añadir la película de grafito a la fibra, fue la de lograr calentar la fibra y formar la imagen de un punto con un láser del que pudiéramos echar mano. El láser que empleamos es de estado sólido, se encuentra en la banda de los 532 nm y genera un haz con

una potencia de 300 mW. Las Figuras 4.9 y 4.10 esquematizan el arreglo experimental empleado en la formación de la imagen sobre la fibra.

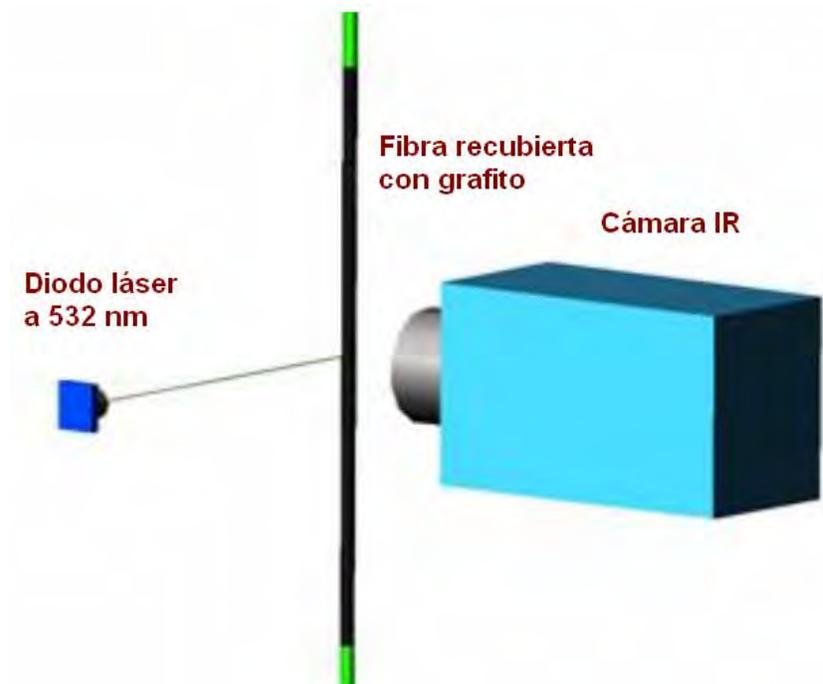


Figura 4.10 Arreglo experimental para la formación de imagen en la fibra.

El experimento consiste en estimular térmicamente la fibra mediante la incidencia del láser sobre la superficie de la fibra. La fibra no se encuentra en contacto con sumidero térmico alguno, y el comportamiento térmico es registrado una vez más, mediante la cámara de IR antes empleada.

La Figura 4.11 muestra la termografía resultante cuando la fibra se encuentra estabilizada en su temperatura máxima. En esta ocasión, el campo de vista de la cámara es de $3750 \times 1450 \mu\text{m}$ y el diámetro del spot del láser es de $375 \mu\text{m}$. El calor suministrado desde el láser hacia la fibra es $Q = 1.205 \times 10^{-5} \text{ J}$.

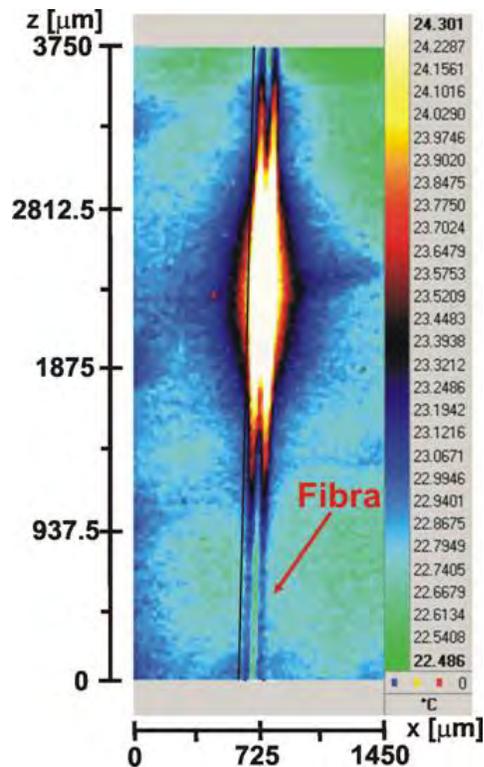


Figura 4.11 Imagen térmica de la fibra irradiada.

A partir de la termografía, se extrae la información sobre el perfil de temperatura en función de la posición a lo largo de la fibra (eje z) y en dirección radial (eje x). La Figura 4.12 muestra ambos perfiles. Una vez más, la ausencia de un sumidero térmico impide la remoción de calor necesaria para reducir el ancho del perfil a altura media, que en este caso llega hasta los 900 μm debido, además, a que la irradiación no se da en un punto matemático, como en el caso del alambre, sino en una superficie correspondiente al diámetro del spot del láser.

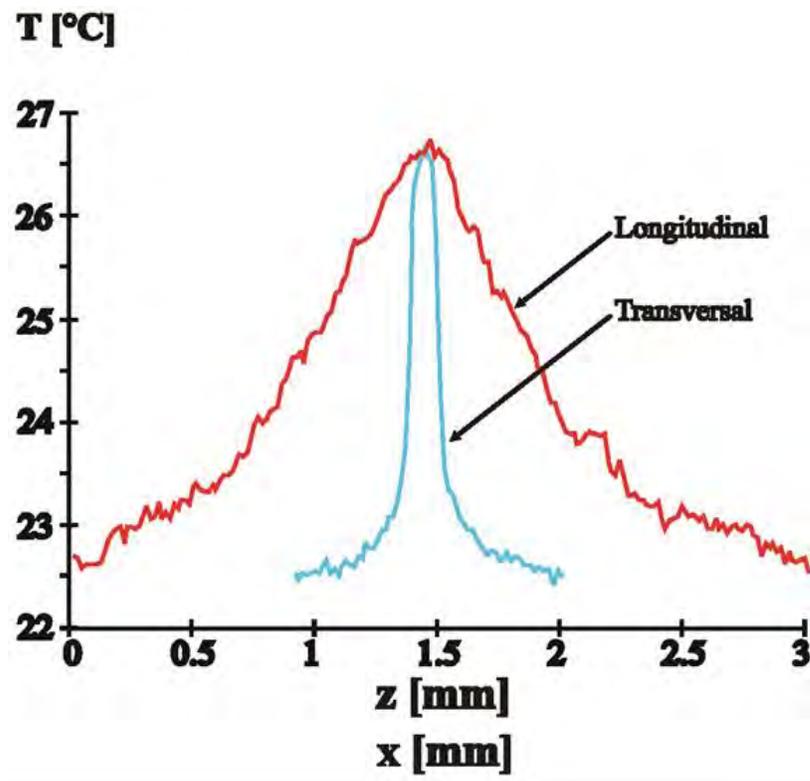


Figura 4.12 Irradiación constante sin sumidero de calor. Temperatura en función de la posición a lo largo de la fibra (eje Z) y a lo ancho (eje X). El ancho a media altura del perfil es $906 \mu\text{m}$.

La información sobre las velocidades de respuesta térmica de la fibra, al proceso radiativo de levantamiento y al meramente convectivo de enfriamiento, se presentan en la Figura 4.13. La similitud entre los tiempos resultantes del proceso radiativo-convectivo, y aquellos obtenidos en el experimento conductivo-convectivo (sin sumidero térmico) del calentamiento por contacto puntual con el alambre, valida la caracterización previa.

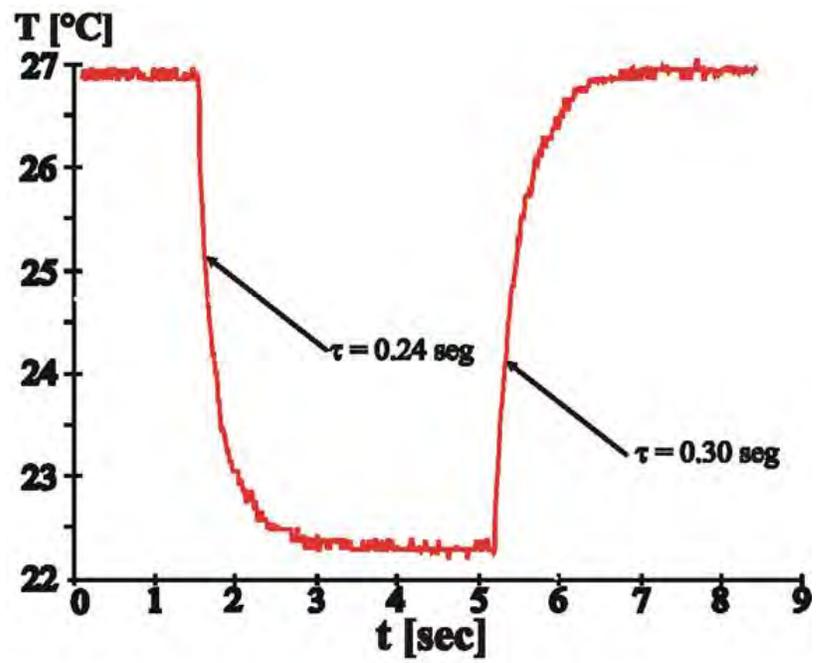


Figura 4.13 Irradiación constante sin sumidero de calor. Cambio en la temperatura de un píxel central como función del tiempo.

4.3 Imagen térmica en una fibra óptica con sumidero térmico

Para obtener un resultado experimental conexas con la simulación previa, es necesario incluir un sumidero térmico que esté en contacto con la fibra. Las Figuras 4.14 y 4.15 muestran un arreglo experimental, similar al empleado anteriormente, que incluye inclusión de un sumidero de calor. La Figura 4.16 es una fotografía de la fibra recubierta con grafito en contacto con una placa de aluminio mediante pasta térmica. Aquí, es posible observar la zona de la fibra que es irradiada por el láser. El calor suministrado por el láser es $Q = 5.106 \times 10^{-7} \text{ J}$.

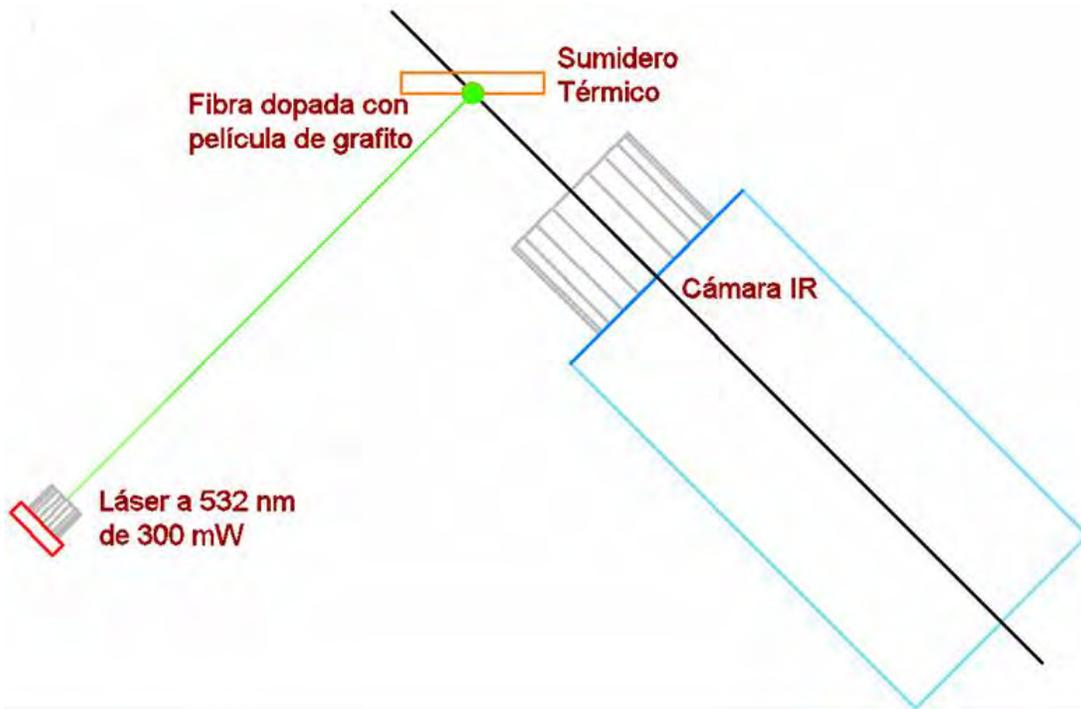


Figura 4.14 La fibra es calentada con un diodo láser de 300 mW a 532nm. Se encuentra en contacto con un sumidero térmico.

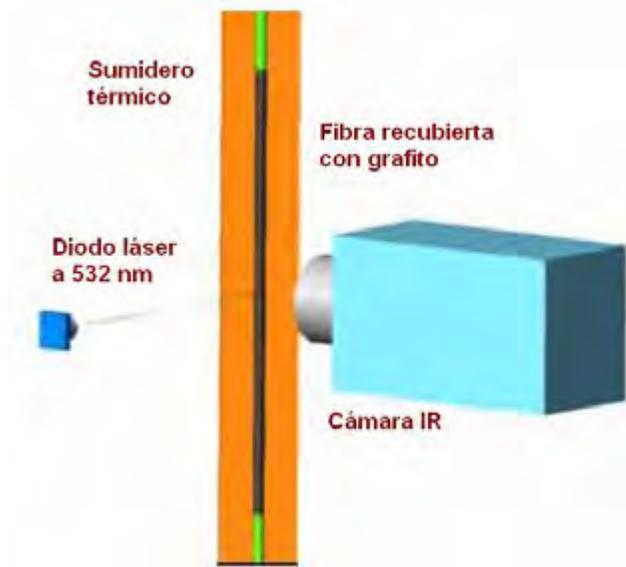


Figura 4.15 Arreglo experimental para formar imagen en una fibra embebida en un sumidero térmico.

En la Figura 4.17 se presenta la termografía obtenida mediante la cámara de IR. El campo de visión es de $1210 \times 578 \mu\text{m}$ y el diámetro del spot es de $375 \mu\text{m}$.

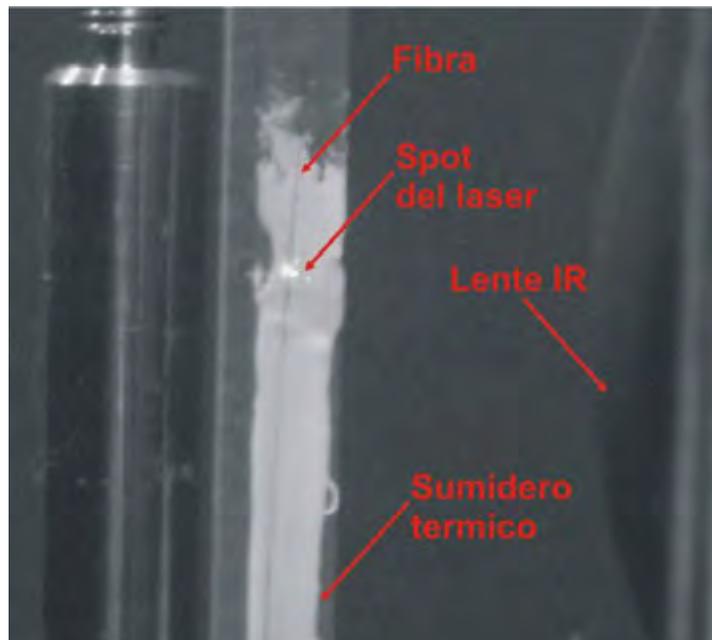


Figura 4.16 Fibra recubierta con grafito en contacto con sumidero térmico

Es evidente desde esta toma, la reducción significativa del ancho del perfil de temperaturas debida a la incorporación del sumidero térmico. Así, mientras el proceso de calentamiento vuelve a ser enteramente radiativo, el proceso de remoción de calor (para la estabilización de la temperatura) y el de enfriamiento, ahora se vuelve conductivo-convectivo. Esto significa una reducción sensible en el ancho a altura media del perfil de temperaturas tal y como se muestra en la Figura 4.18.

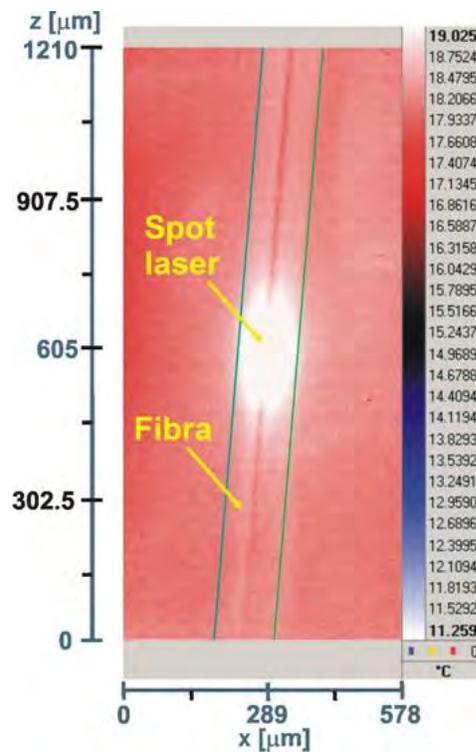


Figura 4.17 Imagen térmica de la fibra irradiada.

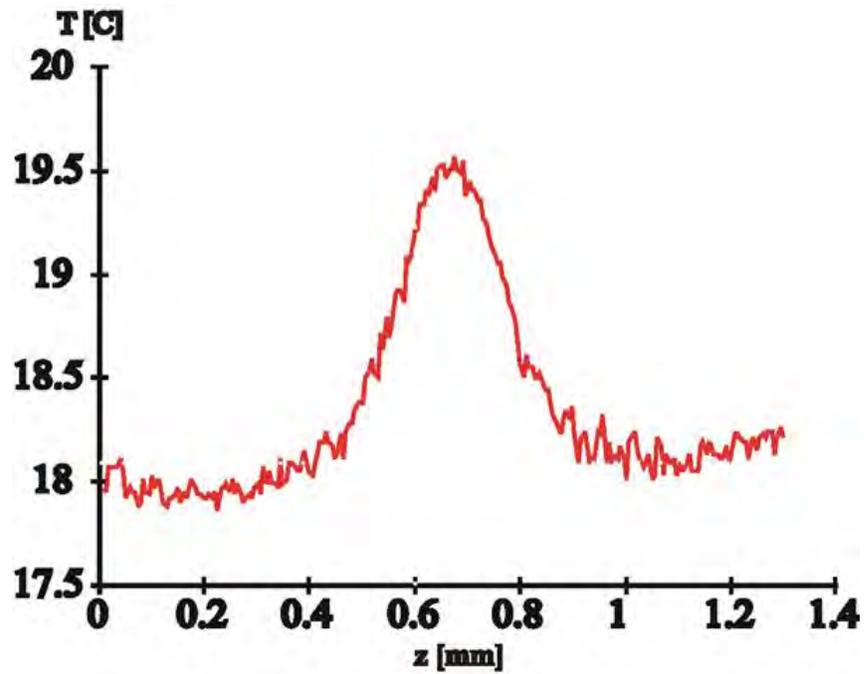


Figura 4.18 Irradiación constante con sumidero térmico. Temperatura en función de la posición a lo largo de la fibra (eje Z). El ancho a media altura del perfil es 200 μ m.

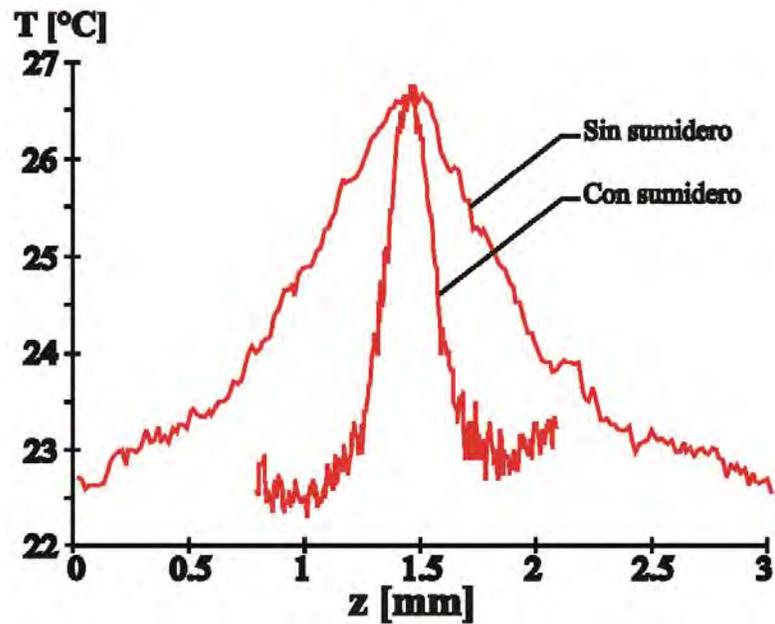


Figura 4.19 Comparación entre fibra con y sin sumidero térmico. Temperatura en función de la posición a lo largo de la fibra (eje Z). El ancho a media altura del perfil se reduce al 22%.

El ancho a altura media del perfil de temperaturas es de 200 μm , casi la mitad de aquel obtenido sin el sumidero térmico (ver Figura 4.19).

Por otra parte, los resultados experimentales correspondientes a la velocidad de respuesta térmica presentan una mejora importante. Así, los tiempos de levantamiento y extinción en el calentamiento de la zona irradiada de la fibra decrecen en aproximadamente un orden de magnitud en relación con aquellos donde el sumidero de calor no se encontraba presente.

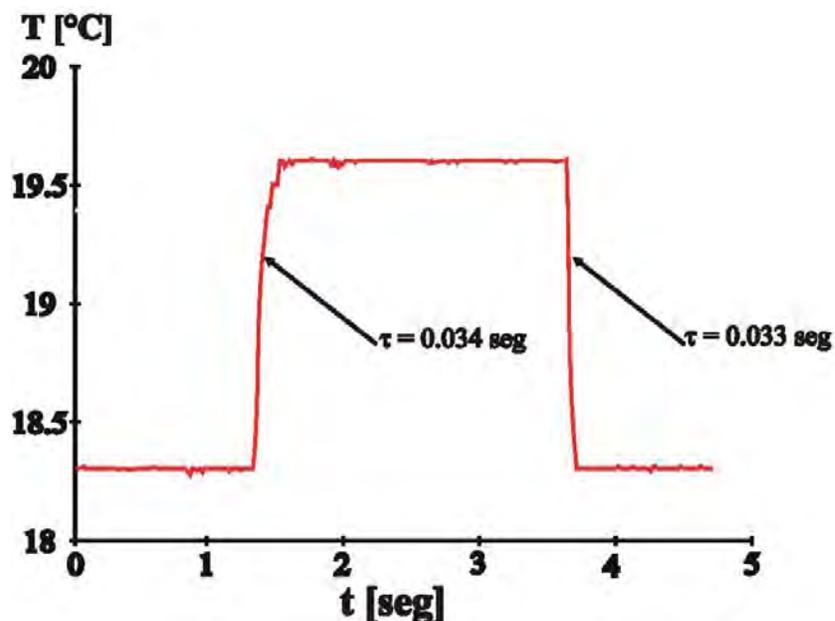


Figura 4.20 Irradiación pulsada con sumidero térmico. Cambio en la temperatura de un píxel central como función del tiempo.

Los resultados experimentales obtenidos, al incluir un sumidero térmico, se acercan más a los resultados de la simulación realizada con anterioridad. Con respecto al perfil de temperaturas, que determina la resolución espacial del

convertidor, se encuentra que la variación entre el perfil de temperatura normalizado simulado y medido no varía en más de 1% (ver Figura 4.21). Ambos perfiles poseen un ancho a altura media de 200 μm , lo cual, al seguir el criterio de resolución de Rayleigh, indica que la distancia mínima entre dos picos para que puedan resolverse debe ser de 245 μm o el equivalente a 2 veces el diámetro de la fibra.

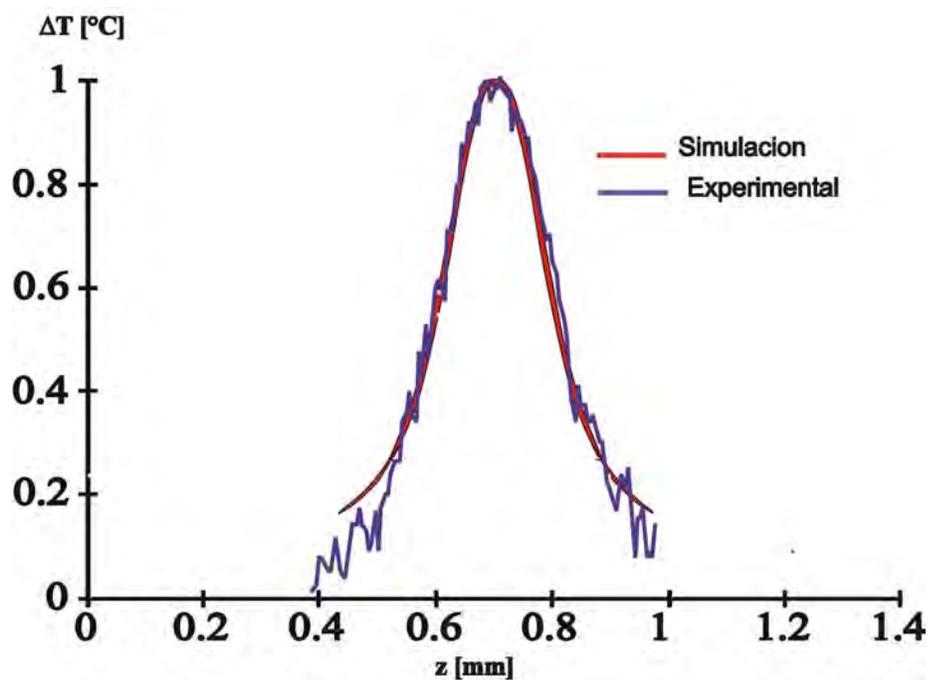


Figura 4.21 Comparación de perfil de temperatura. Cambio de temperatura normalizado en función de la posición a lo largo de la fibra (eje Z). Comparación entre simulación numérica y resultados experimentales.

Por otra parte, los tiempos de levantamiento y extinción obtenidos, al disminuir gracias a la inclusión del sumidero, se acercan a los tiempos simulados de respuesta térmica. El tiempo de extinción obtenido (ver Figura 4.22) es 8 veces superior al previsto.

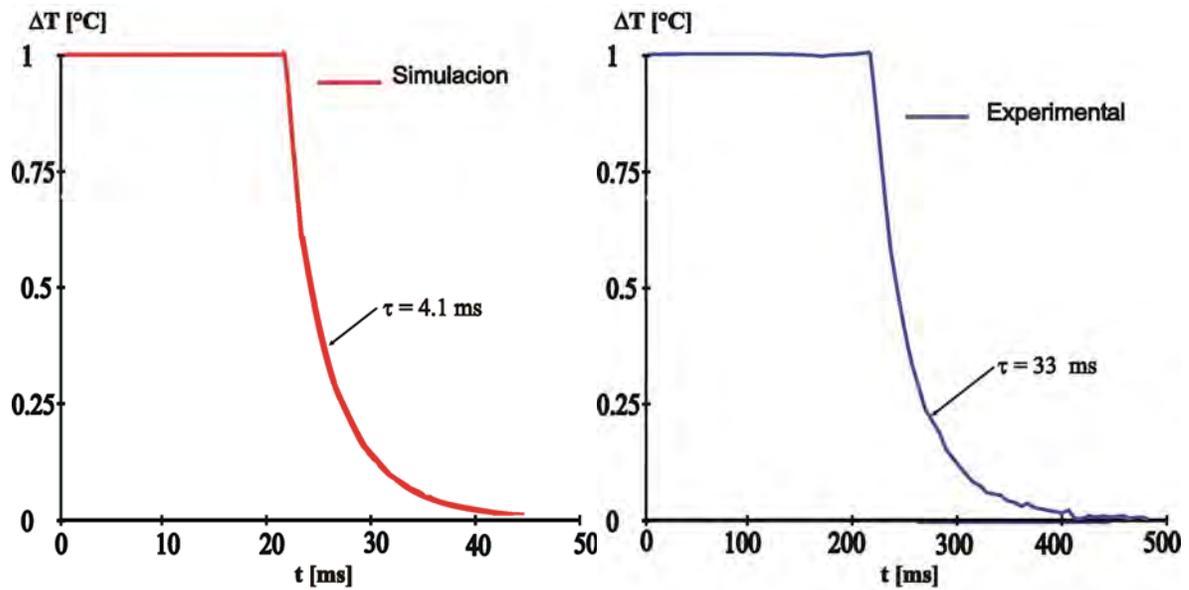


Figura 4.22 Comparación entre tiempos de levantamiento. Cambio normalizado en la temperatura de un píxel central como función del tiempo. Comparación entre simulación numérica y resultados experimentales.

El tiempo de levantamiento experimental es alrededor de 8 veces superior con respecto del simulado (ver Figura 4.23).

Si bien el sumidero térmico efectivamente reduce en un orden de magnitud los tiempos de respuesta, el proceso de transferencia demostró ser más lento de lo que se esperaba. Una imagen térmica podría escribirse y borrarse en casi 200ms. Esto, sin lugar a dudas indica que el posible empleo de esta configuración específica en aplicaciones de video es imposible.

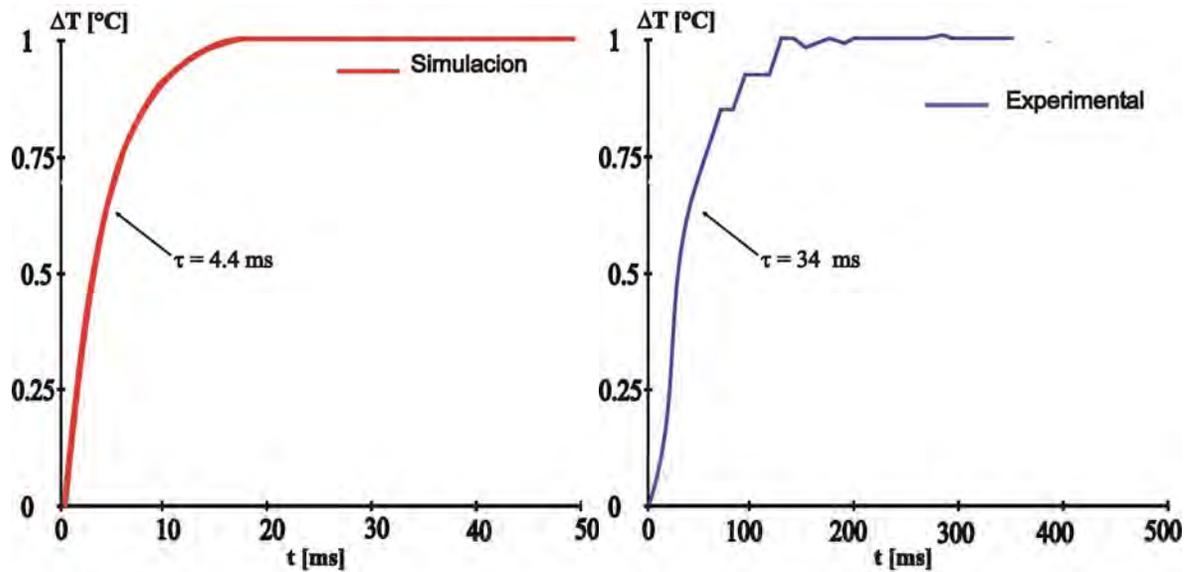


Figura 4.23 Comparación entre tiempos de levantamiento. Cambio normalizado en la temperatura de un píxel central como función del tiempo. Comparación entre simulación numérica y resultados experimentales.

Sin embargo, lo anterior no presenta problema alguno. Como se verá más adelante, la constante de tiempo térmica del sistema puede diseñarse una vez que se conoce el coeficiente de transferencia de calor del proceso térmico. Las caracterizaciones que se han llevado a cabo, son parte de una metodología general que, entre otras cosas, nos permite conocer dicho coeficiente.

De tal suerte, si bien con la configuración presente no es posible aplicar el dispositivo en conversión a velocidades de video, la modificación de algunos parámetros geométricos en la fibra, por ejemplo, pueden sin lugar a dudas disminuir la constante de tiempo del sistema para alcanzar las velocidades de respuesta próximas a los 16 ms.

4.4 Imagen térmica en una placa de vidrio con sumidero térmico

Una posible modificación a la configuración del elemento de conversión del dispositivo mostrada con anterioridad en la Figura 1.4 es el cambio del arreglo de fibras ópticas por una guía de onda tipo *slab* de silicio dopada con Erbio en la que la luz bombeada viaje de igual manera a través de ella excitando a los iones de dopante para emitir la fluorescencia en visible dependiente de la temperatura. La imagen térmica sería entonces formada sobre la placa y el proceso entero de conversión se debe repetir.

Para conocer si hay cambios importantes en términos de la resolución espacial y temporal del convertidor, se desean estudiar ahora las propiedades térmicas de una placa de vidrio sometida a un estímulo térmico

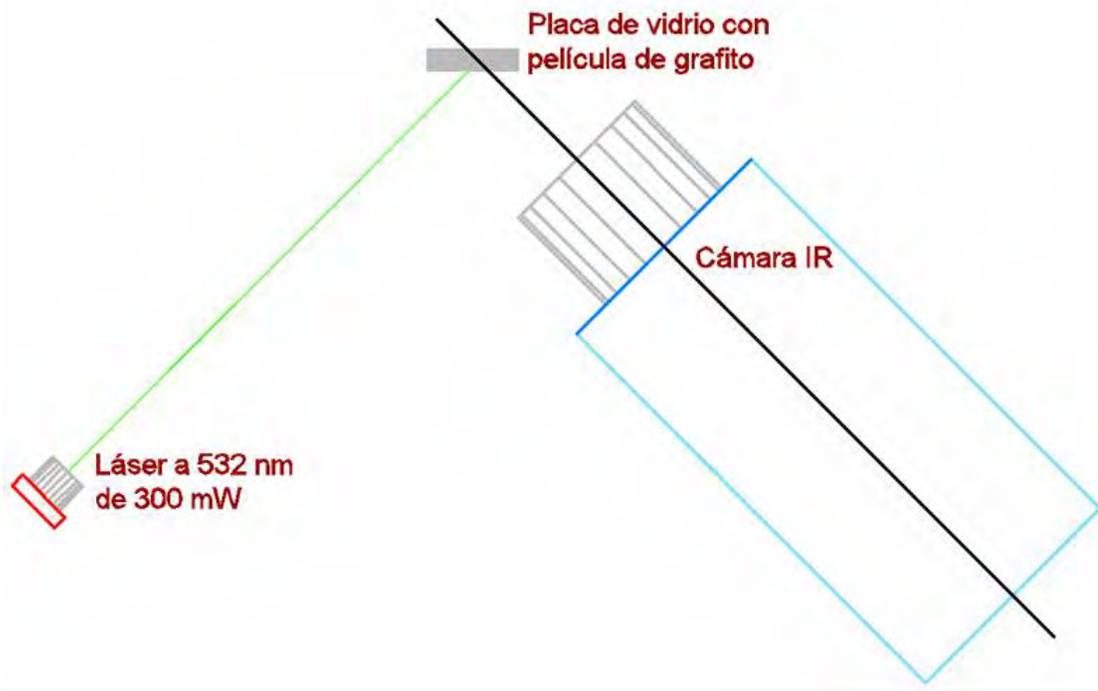


Figura 4.24 Una placa de vidrio es calentada con láser a 300 mW a 532nm. Posee una película de grafito para simular la absorción en IR.

El arreglo experimental, que se esquematiza en las Figuras 4.24 y 4.25, es similar a los arreglos pasados en los que se generó imagen térmica mediante el láser a 532 nm.

La diferencia radica en que ahora se introduce una placa de vidrio (sílica) de 1 mm de espesor, recubierta con película de grafito en el lugar donde antes se colocó la fibra. La placa también se encuentra en contacto con un sumidero térmico de aluminio mediante pasta térmica. La Figura 4.26 es una fotografía de un parte del arreglo experimental.



Figura 4.25 Arreglo experimental para generar imagen térmica sobre una placa de vidrio recubierta con grafito.

La termografía obtenida se muestra en la Figura 4.27. El campo de vista en este caso es de $3500 \times 2500 \mu\text{m}$ y el ancho del spot del láser es $375 \mu\text{m}$. Aquí, podemos observar que el perfil de temperaturas mantiene simetría de rotación. El calor suministrado es $Q = 1.149 \times 10^{-5} \text{ J}$.

El perfil de la temperatura como función de la posición a lo largo de la placa se presenta en la Figura 4.28. El perfil presenta un ancho a altura media de $875 \mu\text{m}$ principalmente debido al valor de diámetro del haz láser.

La respuesta temporal del calentamiento y enfriamiento de la fibra se muestran en las Figuras 4.29 y 4.30 respectivamente. Los tiempos de respuesta son grandes tomando en cuenta la presencia del sumidero térmico, pero se deben principalmente a que la capacitancia térmica de la placa es mayor debido a que sus dimensiones (relacionadas con su masa térmica) son mayores. Si bien, la respuesta temporal no puede compararse con aquella de la fibra, si pueden conocerse los coeficientes de transferencia de calor que se encuentran estrechamente relacionados con la constante de tiempo térmica.

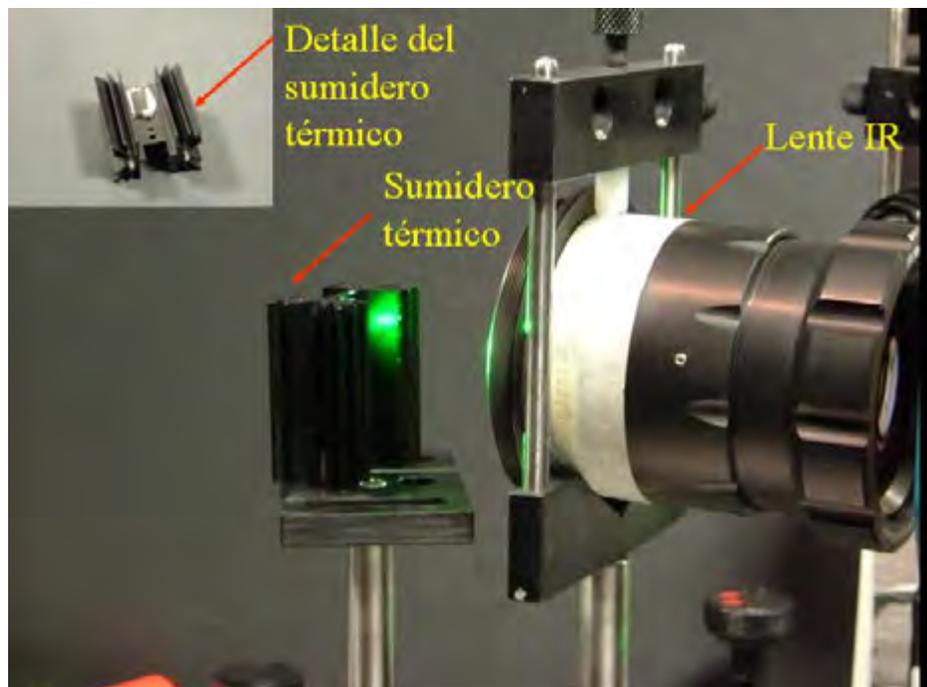


Figura 4.26 La placa se encuentra en contacto con un sumidero térmico para remover el calor excedente.

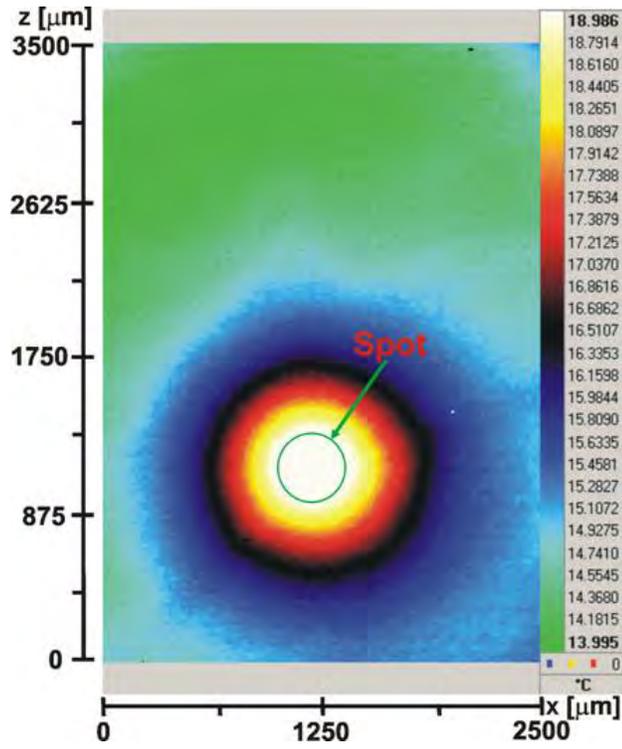


Figura 4.27 Imagen térmica de la fibra irradiada. El diámetro del spot es $375 \mu\text{m}$.

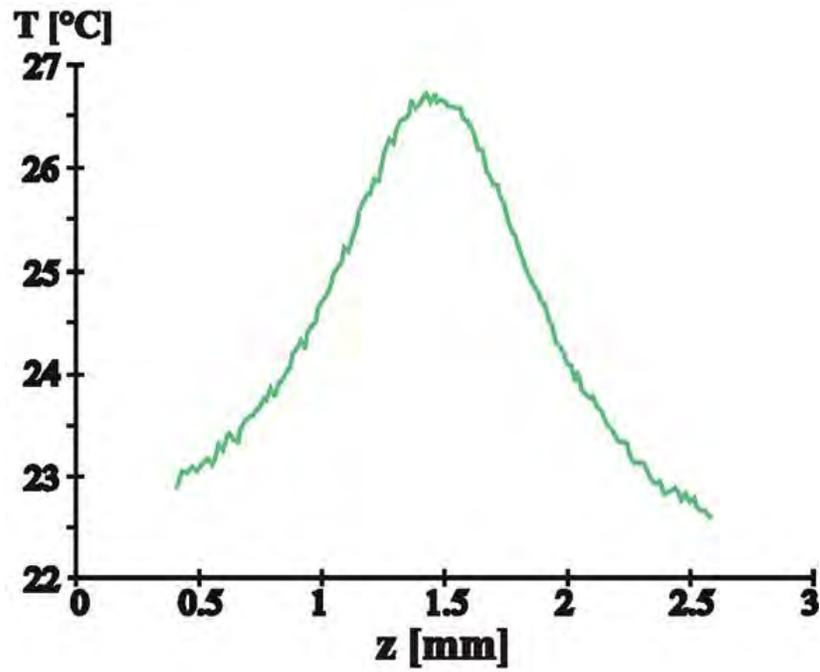


Figura 4.28 Irradiación constante con sumidero térmico. Temperatura en función de la posición a lo largo de la fibra (eje Z). El ancho a media altura del perfil es 875 μ m.

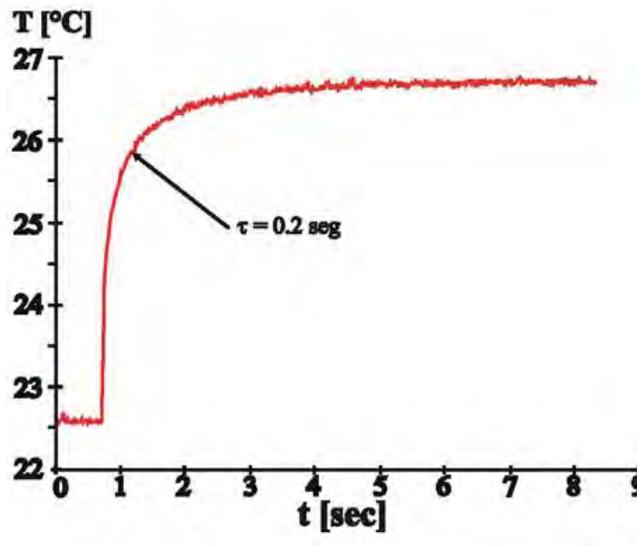


Figura 4.29 Irradiación pulsada con sumidero térmico
Cambio en la temperatura de un píxel central como función del tiempo.

Los coeficientes de transferencia de calor se determinan a partir de la ecuación para la constante de tiempo (Ec. 4.1) que asume al proceso térmico como aquel de la carga y descarga de un capacitor eléctrico. Así, la constante depende de la capacitancia térmica (fuertemente ligada al calor específico y la masa térmica) y a la resistencia térmica (vinculado con el coeficiente de transferencia de calor).

$$\tau = R_t C_t \quad (4.1)$$

Aquí, R_t es la resistividad térmica y es igual a $(1 / U A)$, donde U es el coeficiente total de transferencia de calor y A la superficie de transferencia. C_t es la capacitancia térmica y es igual a $(\rho V c)$, densidad por volumen (masa) por calor específico.

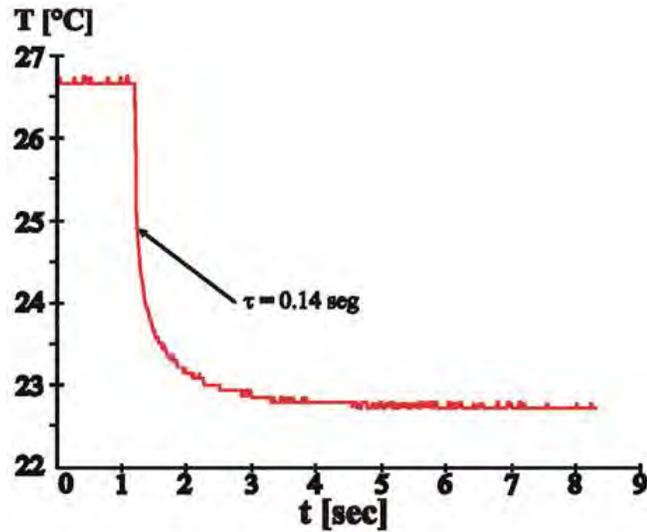


Figura 4.30 Irradiación pulsada con sumidero térmico
Cambio en la temperatura de un píxel central como función del tiempo.

Así, el coeficiente total de transferencia de calor puede encontrarse a partir de las propiedades térmicas del material empleado y de la geometría del elemento (Ec. 4.2).

$$U = \frac{1}{\tau A} \rho V c \quad (4.2)$$

Con ayuda de la Ec 4.2, para el caso de la fibra óptica, el coeficiente total de transferencia para el enfriamiento es $U = 7.77 \times 10^3 \text{ kg/s}^3 \text{ K}$, mientras que para el calentamiento es $U = 7.54 \times 10^3 \text{ kg/s}^3 \text{ K}$.

Para la placa, en el proceso de enfriamiento, $U = 5.49 \times 10^4 \text{ kg/s}^3 \text{ K}$, mientras que para el proceso de calentamiento, $U = 3.84 \times 10^4 \text{ kg/s}^3 \text{ K}$.

Con la ayuda de estos coeficientes, que son valores experimentales y no cambian para un mismo proceso de transferencia, es posible diseñar la constante de tiempo que satisfaga un desempeño deseado del convertidor. Para ello, basta modificar los parámetros de la Ec. 4.2.

Con esta información, y a manera de ejercicio, para el caso de arquitectura del dispositivo por fibra óptica, podemos ahora encontrar el diámetro de la fibra que nos permitiría acercarnos a tiempos de calentamiento y enfriamiento tales que sería posible convertir imagen térmica a velocidades de video.

Así, si se deseara una τ de calentamiento de 4 ms (al 63.2%), según la Ec 4.1, y tomando en cuenta el valor del coeficiente de transferencia calculado don la Ec 4.2, el diámetro de la fibra debería ser de aproximadamente 15 micras. Este tipo de fibras pueden fabricarse perfectamente mediante novedosas técnicas de construcción de nanofibras.

Por otro lado, el parámetro que si puede compararse en forma casi directa entre la placa y la fibra es el del perfil de temperaturas. La Figura 4.31 muestra los perfiles superpuestos de la placa con sumidero y la fibra sin sumidero. Lo importante aquí, es que en términos de la forma del perfil, no se aprecian cambios significativos.

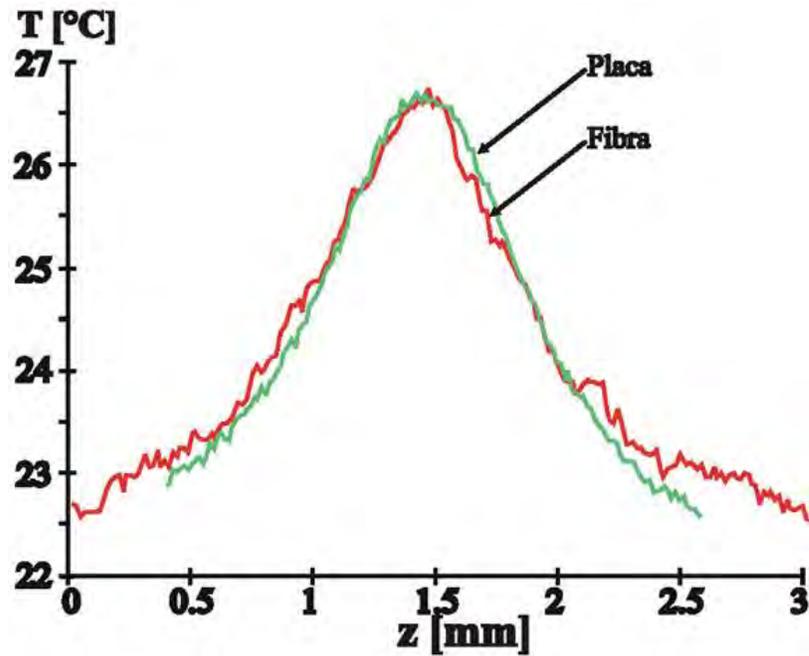


Figura 4.31 Comparación del perfil de temperatura entre fibra y placa

Ahora que se han comprobado experimentalmente las propiedades térmicas de la fibra, y que se conoce la dependencia entre la radiación por fluorescencia en visible y la temperatura es posible tratar de convertir una imagen térmica en visible. El siguiente capítulo trata de los arreglos experimentales llevados a cabo para la obtención de tal fin.

4.5 Conclusiones parciales

a) Obtuvimos la respuesta espacio-temporal de la fibra para un estímulo térmico en diversas configuraciones.

b) Hemos comprobado experimentalmente los resultados de comportamiento térmico obtenidos de la simulación numérica.

c) El ancho medio mínimo obtenido es de 200 μm . La distancia mínima entre picos para que puedan ser resueltos es de nueva cuenta 245 μm . Esta resolución puede modificarse sensiblemente pues sólo depende del diámetro de la fibra a razón de 2 a 1, es decir la resolución es 2 veces el diámetro de la fibra.

d) La imagen térmica puede escribirse y borrarse en alrededor de 200 ms. Sin embargo, la velocidad de respuesta del sistema puede diseñarse mediante la modificación de las propiedades geométricas y térmicas de la arquitectura y materiales. Esto es posible gracias a que se han encontrado los parámetros térmicos de diseño.

e) No hemos encontrado cambios significativos en la forma del perfil de temperaturas entre la configuración de sensor con placa y con fibra.

CAPÍTULO V

Conversión de Imagen

En el presente capítulo se presentan los diversos experimentos que se efectuaron con el fin de convertir imagen térmica en imagen visible. Para el estímulo térmico sobre la fibra se empleó una vez más la técnica de poner en contacto a la fibra con un alambre caliente. Esta vez, como nos interesa controlar la temperatura del alambre, se escogió un alambre nicromel al que se le hace pasar una corriente eléctrica que puede modularse para modificar su temperatura. No se empleó el calentamiento con el láser en 532nm debido a que precisamente esa longitud de onda corresponde a una de las bandas en las que se mide la fluorescencia emitida por la fibra.

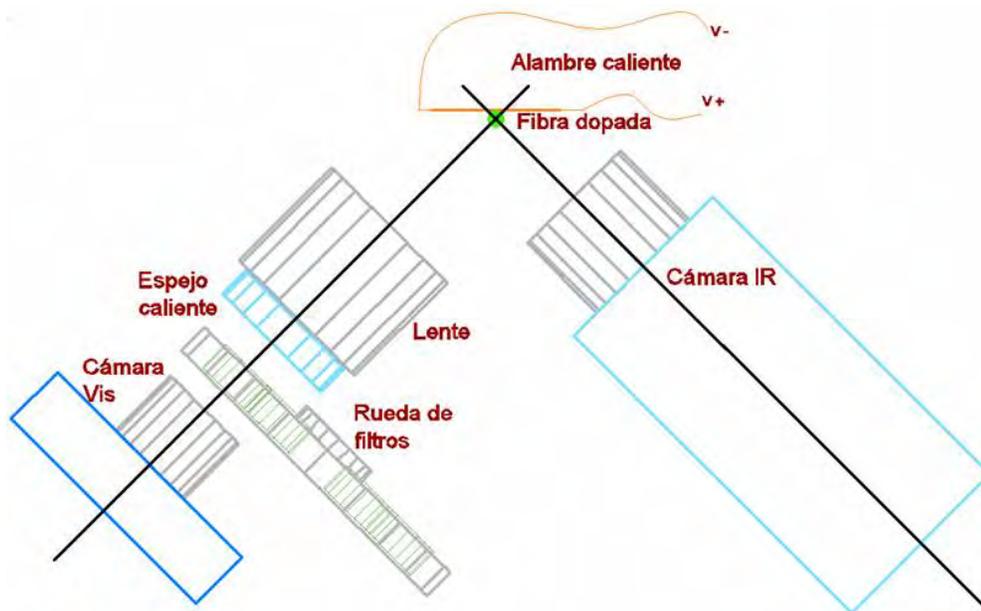


Figura 5.1 El comportamiento espacial y temporal es capturado en IR y visible simultáneamente.

Se efectuaron dos experimentos. El primero, empleando una cámara CCD para convertir la imagen y determinar la resolución espacial. La segunda, empleando una cámara CCD de video para determinar la respuesta espacio-temporal de la conversión.

5.1 Respuesta espacial

El arreglo para convertir imagen se ilustra en las Figuras 5.1 y 5.2. La información en infrarrojo sobre la temperatura de la fibra (que sigue al alambre a medida que este se calienta o enfría) es capturada mediante la cámara de IR de 14 bits y enfriada por refrigeración interna por ciclo Stirling. La información en el visible es registrada en forma de imagen digital por una cámara de alta resolución de 16 bits de profundidad, de 4096 x 4096 píxeles que también está enfriada pero por un proceso termo-eléctrico.

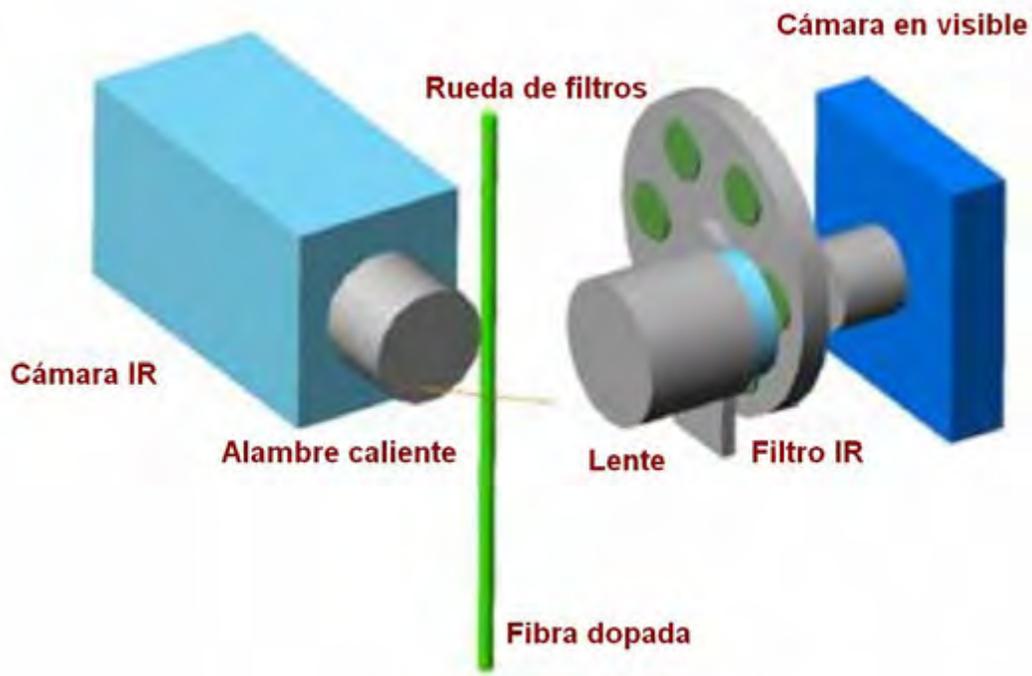


Figura 5.2 Arreglo experimental para convertir imagen.

Ambas imágenes, térmica y visible, son registradas en forma simultánea y después comparadas entre sí. Para la adquisición de la imagen en visible es necesaria la incorporación de una serie de filtros entre la lente que forma la imagen de la fibra en el detector de la cámara. Un primer filtro bloquea la radiación incidente en infrarrojo para evitar que la cámara (que es sensible a tal radiación) la vea. Otra serie de filtros, correspondientes a las bandas de interés en el visible, es decir 532nm y 550nm, son colocados después para obtener las imágenes espectrales que después son procesadas con el objeto de encontrar la señal de la razón de intensidades del visible.

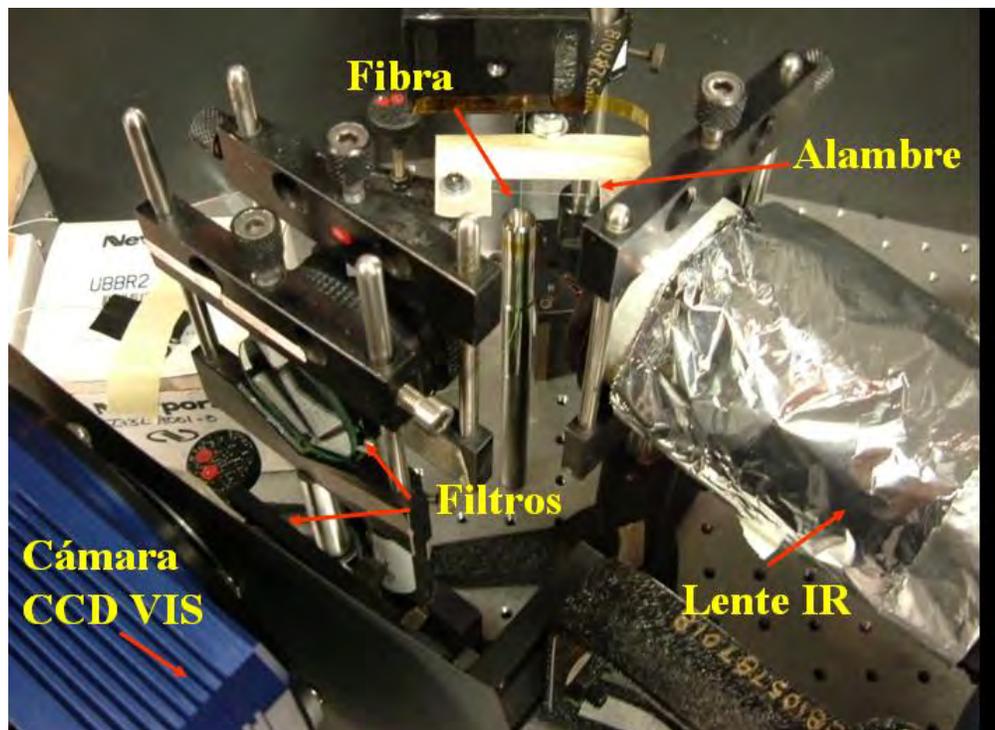


Figura 5.3 La información en visible es capturada en las bandas de fluorescencia a 532 nm y 550 nm, con una cámara termo-enfriada de 16-bits y 4096x4096 píxeles.

En la Figura 5.3 podemos ver una fotografía del arreglo experimental empleado. El arreglo se debió aislar de las corrientes de aire para evitar enfriamientos bruscos por convección que modificaran súbitamente la temperatura de alambre y fibra.

La termografía obtenida una vez alcanzada la estabilización entre el calor transferido por conducción hacia la fibra y el calor removido de ella por convección se muestra en la Figura 5.4. Una vez más pueden apreciarse la fibra (elemento vertical) y el alambre (elemento horizontal con cierta inclinación debida a la perspectiva).

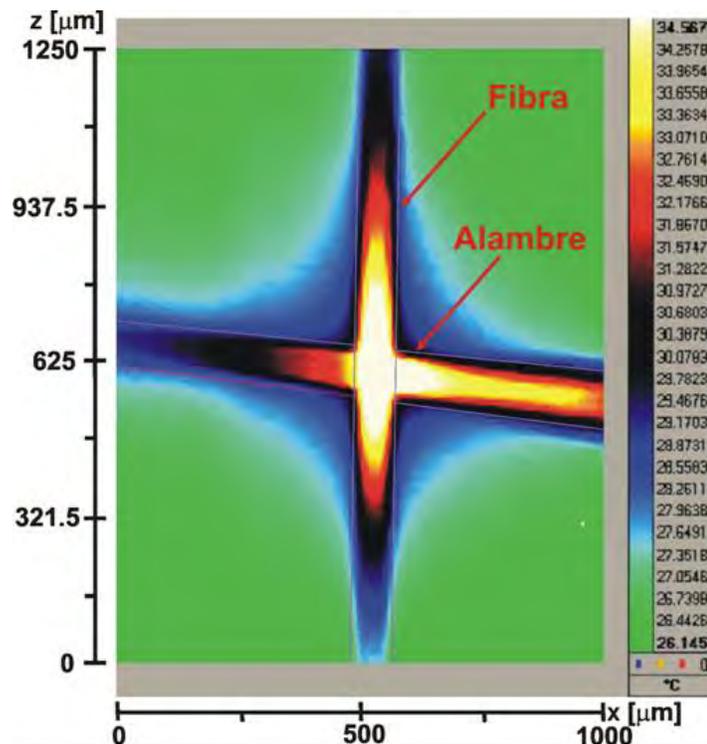


Figura 5.4 Termografía de la fibra calentada. Una corriente es modulada a través del alambre para variar su temperatura.

La termografía tiene un campo de visión de $1250 \times 1000 \mu\text{m}$. Es visible en forma clara la diferencia en la temperatura del aire en el plano objeto que rodea a la región de contacto.

A partir de la dependencia encontrada entre la razón de intensidades de fluorescencia y la temperatura, comentada en el capítulo III, se calculó la distribución de la razón de intensidades a partir de la distribución de la temperatura como función de la posición a lo largo de la fibra obtenida con la cámara de IR.

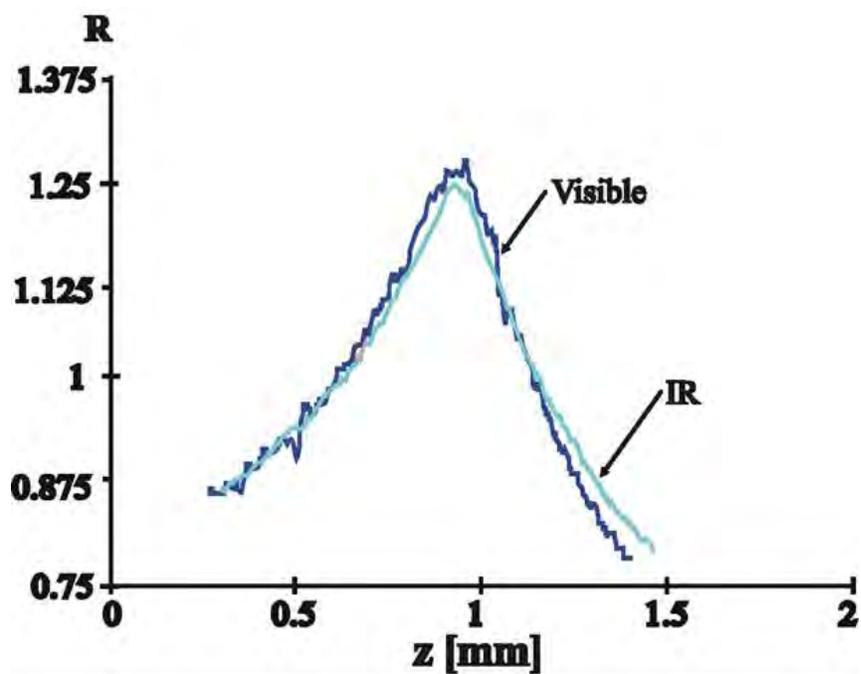


Figura 5.5 Comparación entre el perfil de razón de intensidades entre IR y visible. Razón de intensidades (532/550) en visible (medida) y en IR (calculada) como función de la posición a lo largo de la fibra (eje Z) a 34°C . El ancho del perfil a altura media es $396\mu\text{m}$.

Así, la distribución de razón de intensidades calculada a partir de la información de IR se muestra en la Figura 5.5 al mismo tiempo que se grafica la razón de intensidades medida directamente con la cámara de visible.

De esta manera, la Figura 5.5 representa la primera conversión de imagen térmica a visible lograda con este novedoso método, donde, como puede observarse, el margen de error entre ambas imágenes es pequeño.

La Figura 5.6 presenta la diferencia entre los perfiles de razón de intensidades. El error máximo encontrado es de 5%.

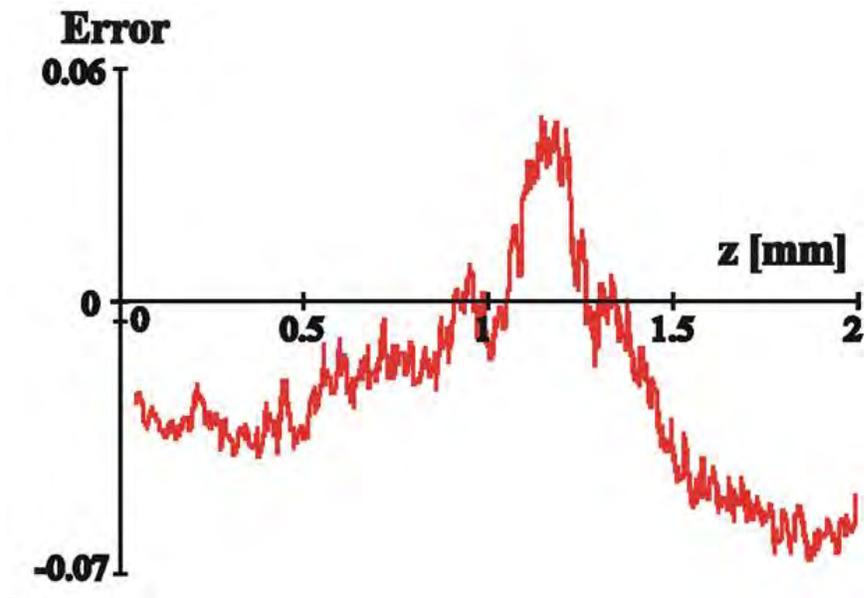


Figura 5.6 Error entre perfil de razón de intensidades entre IR y visible

5.2 Respuesta espacio-temporal

Ahora bien, una vez que se ha verificado el buen comportamiento del convertidor en términos de resolución espacial (5 % de error) se desea conocer el comportamiento en términos de la respuesta temporal.

Para ello, se montó el arreglo que se esquematiza en las Figuras 5.7 y 5.8. La única variante al arreglo con respecto al anterior es la incorporación de una cámara de video de alta sensibilidad (0.002 lux mínimo) de 8 bits, para registrar en el tiempo, y en el visible, el calentamiento de la fibra. La Figura 5.9 es una fotografía del arreglo experimental montado.

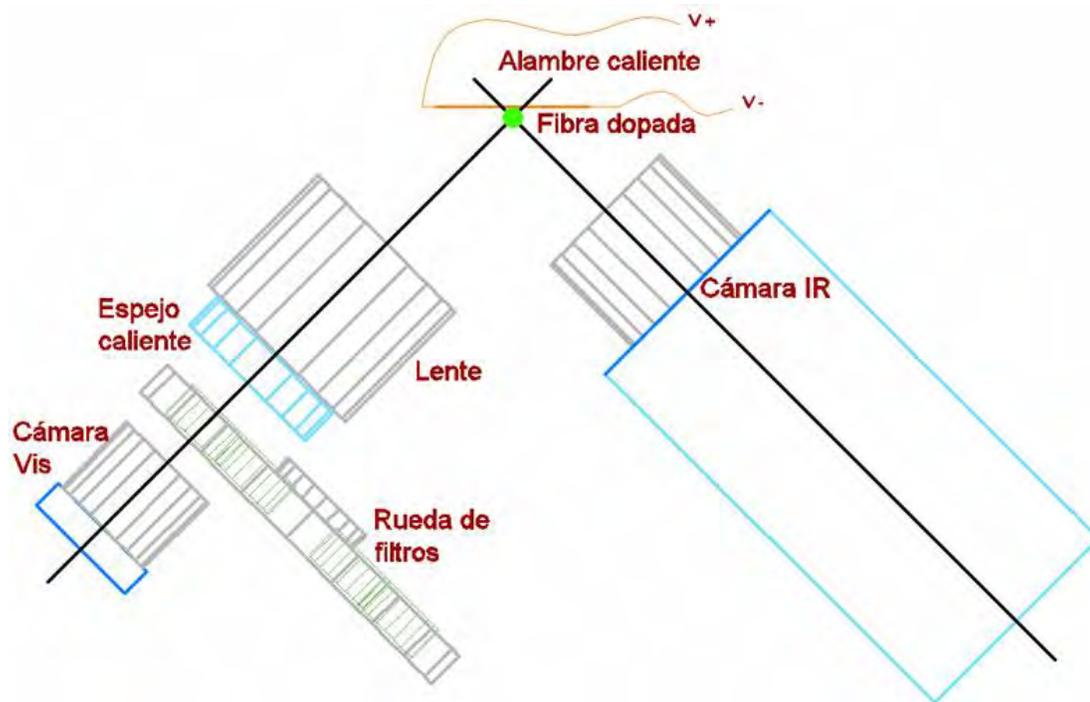


Figura 5.7 El comportamiento térmico es registrado como función del tiempo en IR y visible simultáneamente.

La Figura 5.10 es la termografía obtenida con la cámara térmica al momento de estabilizarse la temperatura. La cámara de IR tiene un campo de visión de 1250 x 1000 μm .

Debe mencionarse que si bien la termografía presenta un solo cuadro, en realidad con la cámara de IR se registró el proceso completo de calentamiento y enfriamiento.

Para la obtención de la información en visible del proceso de calentamiento de la fibra, fue necesario el desarrollo de un programa computacional que permitiera la captura y procesamiento digital de la señal de video proporcionada por la cámara de alta sensibilidad. Las figuras 5.11 y 5.12 muestran la imagen que la cámara de video registra de la fibra calentada.

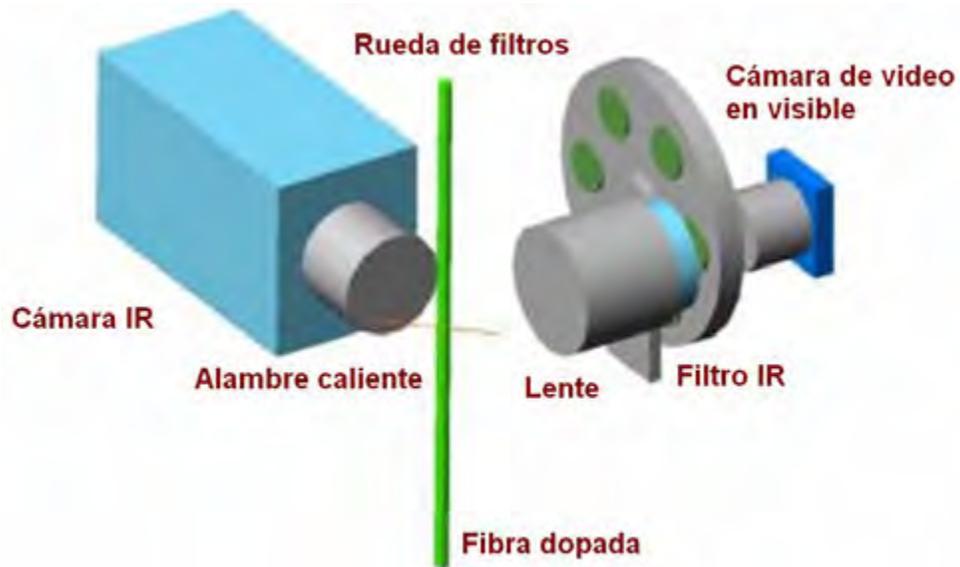


Figura 5.8 Arreglo experimental para la conversión de imagen térmica en visible como función del tiempo.

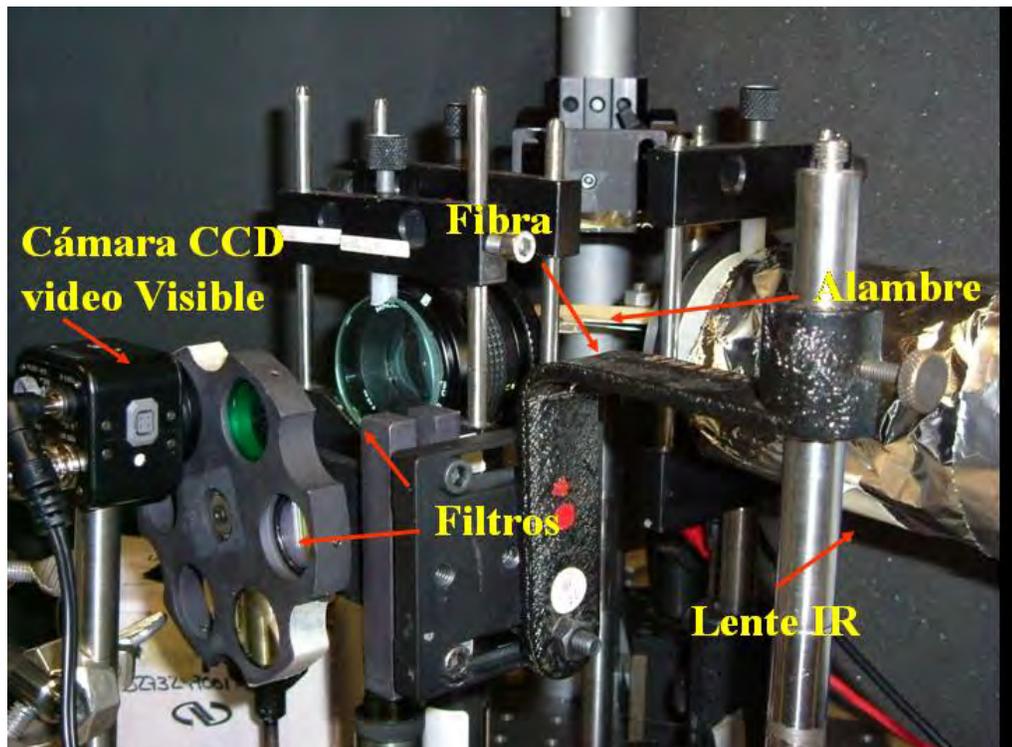


Figura 5.9 Las intensidades de fluorescencia en visible son capturadas con una cámara CCD de video de alta sensibilidad (0.002 lux mínima), de 8 bits a 60 cps.

El programa computacional registra cada cuadro que la cámara envía, registra el valor de los píxeles de la fibra, y los exhibe en la pantalla a manera de perfil de intensidad. Posteriormente, filtra la información y genera un archivo con la información del perfil de intensidades para cada cuadro. El proceso se repite para cada banda en forma independiente aprovechando la alta repetitividad del proceso de calentamiento y enfriamiento. Los archivos con la información espectral son después correlacionados en el tiempo para generar el perfil de intensidades de fluorescencia como función de la posición a lo largo de la fibra, para cada cuadro.

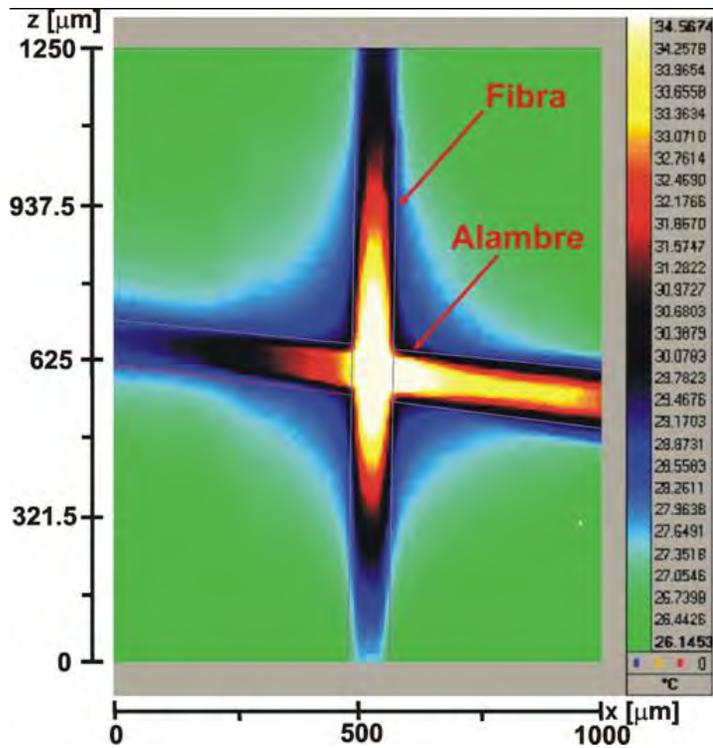


Figura 5.10 Imagen térmica de la fibra calentada

La matriz que contiene todos los perfiles de razón de intensidades para todos los cuadros expuestos se emplea para generar la Figura 5.13 que muestra el perfil de razones de intensidades generados a partir de la señal de video en comparación con el perfil de razón de intensidades calculado a partir del perfil de temperaturas registrado con la cámara de IR.

Como puede apreciarse, si bien el error máximo es mayor (cercano al 21%), según lo muestra la Figura 5.14, el perfil se mantiene. Este error se debe a que ahora la adquisición de la información en visible se hace con cámaras de 8 bits.

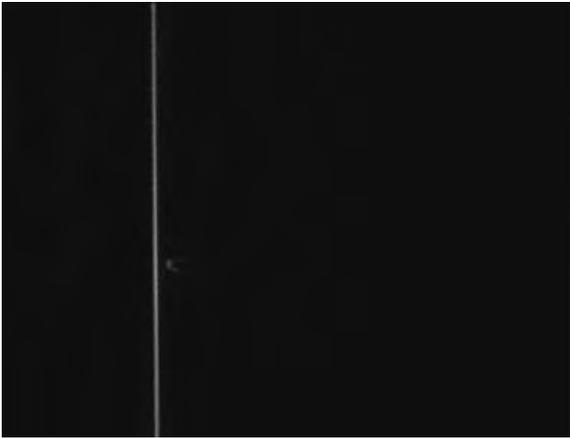


Figura 5.11 Imagen en visible de la fibra en la banda de 550nm



Figura 5.12 Imagen en visible de la fibra en la banda de 532nm

Sin embargo, este error no es significativo ya que el interés particular de este experimento es encontrar la respuesta temporal del convertidor.

La Figura 5.15 muestra el comportamiento de la razón de intensidades (obtenida en visible y la calculada a partir de la información en IR) como función de la posición a lo largo de la fibra con el tiempo como parámetro.

A partir de esta información se generan la Figura 5.16 que muestra los tiempos de levantamiento en el calentamiento de la fibra, vistos en IR y en visible. La variación entre levantamiento de ambos procesos fluctúa en 6.2%.

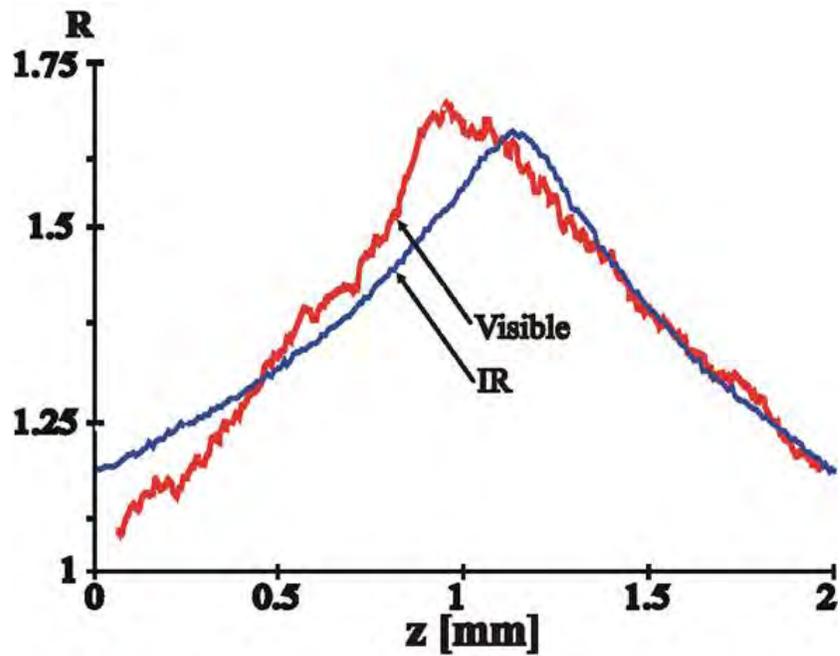


Figura 5.13 Comparación entre el perfil de razón de intensidades entre IR y visible. Razón de intensidades en visible (medida) y en IR (calculada) como función de la posición a lo largo de la fibra (eje Z) a 42 °C). El ancho del perfil a altura media es 390 μ m.

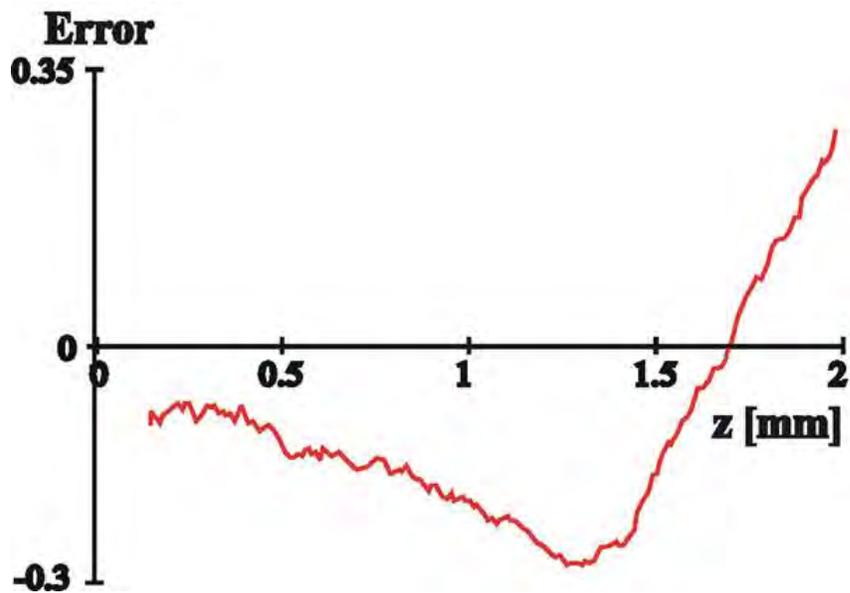


Figura 5.14 Error entre perfil de razón de intensidades entre IR y visible

La Figura 5.17 muestra los tiempos de extinción para el proceso en visible y en IR. Aquí, la fluctuación es de sólo 2%. Puede apreciarse entonces que la conversión de imagen térmica a imagen real es un proceso que puede completarse satisfactoriamente y con un margen de error tanto espacial como temporal muy escaso.

Es importante señalar que para que la conversión pueda darse a las velocidades necesarias para aplicación de video, el proceso de conversión debe ser más rápido que el proceso térmico. En nuestro caso, el fenómeno de fluorescencia por absorción de estado excitado posee tiempos de decaimiento menores a aquellos presentados por el proceso térmico.

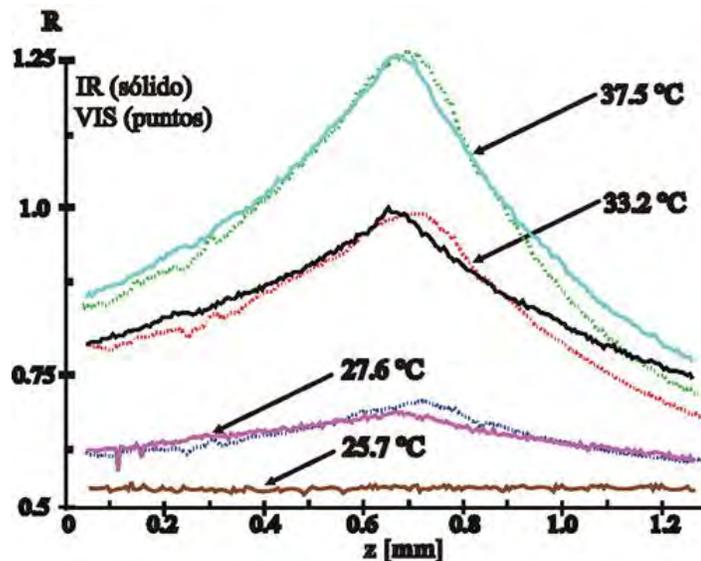


Figura 5.15 Calentamiento constante sin sumidero térmico. Razón de intensidades como función de la posición a lo largo de la fibra (eje Z) con el tiempo como parámetro.

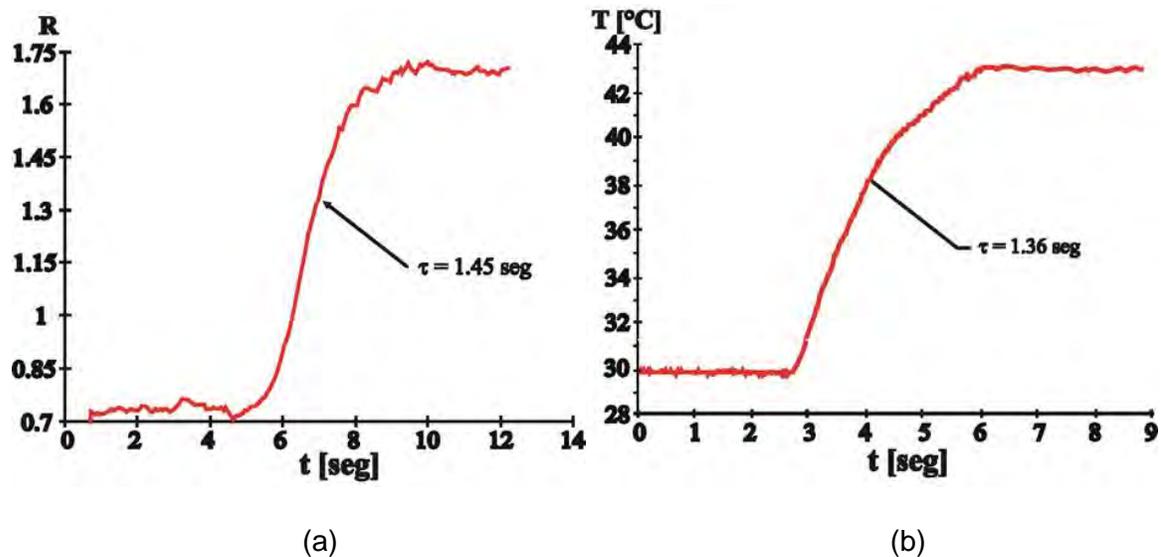


Figura 5.16 Calentamiento pulsado sin sumidero térmico. Cambio en la razón de intensidades en visible (a) y temperatura en IR (b) de un píxel central como función del tiempo.

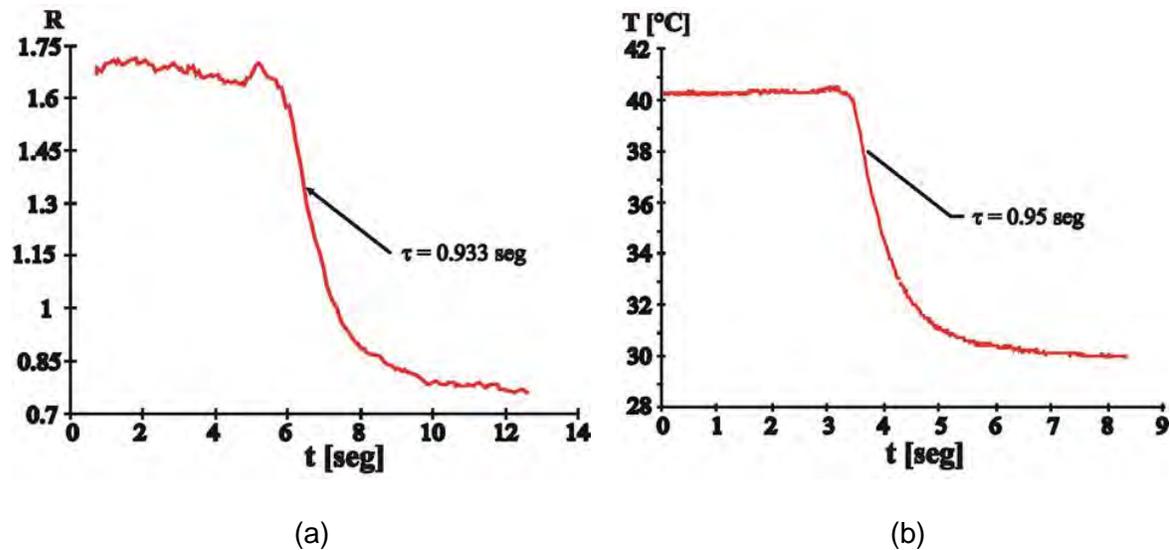


Figura 5.17 Calentamiento pulsado sin sumidero térmico. Cambio en la razón de intensidades en visible (a) y temperatura en IR (b) de un píxel central como función del tiempo.

5.3 Conclusiones parciales

- a) Hemos conseguido convertir imagen térmica en imagen en visible.
- b) El error máximo en el perfil espacial del píxel es de 5% (16 bits).
- c) El error máximo en el perfil temporal es de 6.2% (8 bits).

Conclusiones Generales

Hemos desarrollado una metodología que permite evaluar el comportamiento térmico del convertidor de IR a visible. Con dicha metodología es posible valorar diferentes arquitecturas del convertidor así como la posible inclusión de diferentes materiales.

Como primera etapa en la metodología se simuló numéricamente el comportamiento térmico de un elemento sensor. Esto arrojó resultados preliminares sobre el posible desempeño del dispositivo.

Posteriormente encontramos la relación entre la temperatura y la razón de intensidades de la fluorescencia radial. Esto permite predecir el tipo de información en visible que se puede obtener, mediante el proceso de conversión, a partir del comportamiento térmico del detector.

Se comprobaron experimentalmente los resultados de comportamiento térmico obtenidos de la simulación numérica. La distancia mínima entre los picos de los perfiles para que éstos puedan resolverse, según el criterio de resolución de Rayleigh, puede ser de 2 veces el diámetro de la fibra. La velocidad con la que la imagen térmica puede escribirse y borrarse puede diseñarse, a partir de los coeficientes de transferencia de calor obtenidos y de parámetros físicos (diámetro, densidad y calor específico) del elemento sensor, permitiendo así aplicaciones de conversión de imagen a velocidades de video.

Por último, hemos conseguido convertir imagen térmica en imagen en visible. En la conversión encontramos que la fluctuación máxima en términos de resolución espacial entre la imagen térmica y la visible es de 5%. Por otra parte, la variación máxima entre el comportamiento temporal de la imagen convertida con respecto al térmico es de 6.2%.

REFERENCIAS

1. J. Sandoval, G. Paez, M. Strojnik, "Er-doped silica dynamic IR-to-visible image converter," *Infrared Physics & Technology* **46** (1-2), 141-145 (2004).
2. J. Sandoval, M. Strojnik, G. Paez, "Heat transfer analysis of a dynamic infrared-to-visible converter," *Opt. Eng.* **42** (12), 3517-3523 (2003).
3. G. Paez, M. Strojnik, J. Sandoval, "Feasibility concept for dynamic IR-to-visible converter," *Infrared Spaceborne Remote Sensing XI*, Proc. SPIE **5076**, 268-277 (2003).
4. G. Paez, M. Strojnik, J. Sandoval, P. Vacas-Jacques, "Heat transfer analysis of a dynamic IR-to-visible converter," *Infrared Spaceborne Remote Sensing X*, Proc. SPIE **4818**, 290-296 (2003).
5. J. Sandoval, "Modelo Térmico y Caracterización de Fluorescencia Radial de Fibra Óptica Dopada con Er⁺³," tesis, Centro de Investigaciones en Óptica, 1-22 (2003).
6. E. Maurice, G. Monnom, D. Ostrowsky, G. Baxter, "1.2 - μ m transitions in erbium-doped fibers: the possibility of quasi-distributed temperature sensors" *Appl. Opt.* **34**, 4196-4199 (1995).
7. E. Maurice, G. Monnom, B. Dussardier, A. Saïsy, D. Ostrowsky, G. Baxter, "Erbium-doped silica fibers for intrinsic fiber-optic temperature sensor," *Appl. Opt.* **34**, 8019 (1995).

8. E. Maurice, S. Wade, S. Collins, G. Monnom, G. Baxter, "Self-referenced point temperature sensor based on a fluorescence intensity ratio in Yb⁺³-doped silica fiber," *Appl. Opt.* **36**, 8264 (1997).
9. G. Paez, M. Strojnik, "Performance predictions of a Fiber Optic Temperature Sensor," *Infrared Spaceborne Remote Sensing X*, Proc. SPIE **4818**, 100-109 (2002).
10. C. Shoen, S. Sharma, A. Seki, "Near-Infrared Fiber Optic Temperature Sensor," *Fiber Optics and Laser Sensors IX*, R. De Paula, E. Udd, eds., SPIE Proc. **1584**, 79-86 (1991).
11. M. Strojnik, G. Paez, J. Castellon-Urbe, "Radiometric analysis of a fiber optic temperature sensor," *Opt. Eng.* **41** (06), 1255-1261 (2002).
12. J. Castellon-Urbe, G. Paez, M. Strojnik, "Radiometric analysis of a fiber optic temperature sensor," *Infrared Spaceborne Remote Sensing X*, Proc. SPIE **4486**, 164-169 (2002).
13. M. Y. Kleinerman, "Infrared Image Converter," *Unites States Patent 3,639,735*, (1972).
14. M. Y. Kleinerman, "Infrared detection and imaging, method and apparatus," *Unites States Patent 4,061,578*, (1977).
15. S. Tson, U. Efron, T. Hsu, "Near-infrared-to-visible image conversion using a Si liquid-crystal light valve," *Opt. Lett.* **13**, 13-15, (1988).
16. F. Sun, M. Yang, S. Gao, S. Zhao, "New type IR to visible real-time image converter: design and fabrication," in *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing II*, Proc. SPIE **1488**, 2-5 (1991).

17. K. Wickersheim, "Luminescent decay time measurements by use of a CCD camera," *Unites States Patent* **5,304,809**, (1994).
18. G. K. Vlasov, "High Sensitive Transformer of Infrared Images into Visible Range," *Charge-Coupled Devices and Solid State Optical Sensors V*, Proc. SPIE **2415**, 301-319 (1995).
19. Sergio Calixto, Martín Salazar, Manuel Servin, "Photosensitive element for an infrared-to-visible image converter," *App. Opt.* **34**, 3589-3594, (1995).
20. J. Ahearn, "Infrared image converter," *Unites States Patent* **5,519,529**, (1996).
21. H. Willebrand, Y. Astrov, L. Portsel, H. G. Purwins, "Speed properties of a gas-discharge gap IR-visible converter studied with a streakcamera system," *Infrared Technology XIX*, Proc. SPIE **2020**, 528-540 (1993).
22. H. Willebrand, Y. Astrov, L. Portsel, S. Teperick, T. Gauselmann, H. G. Purwins, "Spatially and temporally resolved IR-image detection with a semiconductor-gas-discharge device," *Infrared Technology XX*, Proc. SPIE **2269**, 688-697 (1994).
23. L. Portsel, Y. Astrov, "Glow dynamics in a semiconductor-gas discharge image converter," *J. Appl. Phys.* **81**, 1077-1086, (1997).
24. R. Hayes, "Infrared to visible light image conversion device," *Unites States Patent* **5,703,363**, (1997).
25. M. Y. Kleinerman, "Optical systems for sensing temperature and thermal infrared radiaton," *Unites States Patent* **5,820,265**, (1998).

26. M. S. Scholl, "Thermal considerations in the design of a dynamic IR target," *Appl. Opt.* **21**, 660 (1982).
27. M. S. Scholl, "Spatial and temporal effects due to target irradiation: a study," *Appl. Opt.* **21**, 1615 (1982).
28. M. S. Scholl, "Target temperature distribution generated and maintained by a scanning laser beam," *Appl. Opt.* **21**, 2146 (1982).
29. J.P. Holman, "Heat Transfer," McGraw-Hill, New York, (1968).
30. W. Smith, *Modern Optical Engineering*, p. 162, (Mc Graw Hill, New York, 2000).