



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

Modelo Térmico y Caracterización de Fluorescencia Radial de Fibra Óptica Dopada con Er^{+3}

Presenta:

Ing. Jaime Alberto Sandoval González

Como requisito para obtener el grado de

Maestro en Ciencias (Ópticas)

León, Guanajuato, México, Octubre 2003

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer especialmente al Dr. Gonzalo Páez Padilla, mi asesor y amigo, por su invaluable apoyo y sus atinados consejos a lo largo de estos años, por su claridad y compromiso, y por ser siempre un punto de referencia y motivación.

Así mismo, deseo expresar un gran sentimiento de gratitud hacia la Dra. Marija Strojnik, quien ha sido una fuente inagotable de enseñanzas e ideas, incansable editora y consejera, y en una gran cantidad de ocasiones madre suplente.

A Víctor López deseo manifestarle mi gratitud por sus infinitos consejos, su muy constructiva crítica y su enorme y desinteresado apoyo.

Por último deseo agradecer al Conacyt por su respaldo en la realización de mi trabajo de maestría.

ÍNDICE

Introducción	
Objetivo	i
Contenido	ii
1 Marco de referencia	1
1.1 Infrarrojo	2
1.1.1 Radiación de cuerpo negro	2
1.1.2 Detectores	5
1.1.3 Cámaras	10
1.2 Termografías	15
1.3 Convertidor IR a Visible	22
1.3.1 Fibra	23
2 Estado del arte	28
2.1 Método y aparato para detección de IR y formador de imágenes	28
2.2 Conversión de imágenes de cercano infrarrojo a visible empleando una válvula de luz de cristal líquido de silicio	30
2.3 Nuevo tipo de convertidor en tiempo real de imágenes de IR a visible: diseño y fabricación	32
2.4 Medición del tiempo de decaimiento de luminiscencia por medio de una cámara CCD	34
2.5 Transformador de alta sensibilidad de imágenes infrarrojas al rango visible	36
2.6 Elemento fotosensible para un convertidor de imágenes de infrarrojo a visible	37
2.7 Convertidor de imágenes infrarrojas	38
2.8 Detección de imágenes infrarrojas resueltas espacial y temporalmente con un dispositivo semiconductor con descarga de gas	39
2.9 Dispositivo para conversión de imágenes de luz infrarroja en visible	42
2.10 Sistema óptico para sensado de temperatura y radiación térmica infrarroja	43
3 Modelo térmico	47
3.1 Convertidor IR a Visible	47
3.2 Principio de operación	48
3.3 Modelo de transferencia de calor	51

3.3.1	Diferencias finitas	53
3.3.2	Propiedades térmicas	54
3.4	Simulación	55
3.5	Resultados	57
3.5.1	Irradiación constante sin sumidero de calor	58
3.5.2	Irradiación constante con sumidero de calor	59
3.5.3	Irradiación pulsada sin sumidero de calor	62
3.5.4	Irradiación pulsada con sumidero de calor	63
3.5.5	Resolución espacial	65
4	Caracterización Isotérmica	68
4.1	Arreglo experimental	68
4.2	Procesamiento digital	76
4.3	Repetitividad	80
4.4	Caracterización	83
4.5	Calibración	84
	Conclusiones	91

INTRODUCCIÓN

Objetivo.

El fin último del trabajo que se presenta en este documento es el de sentar las bases para el desarrollo futuro de una tecnología que constituya una alternativa a los métodos tradicionales de obtención de imágenes en el rango espectral del infrarrojo. Dicha tecnología se basa en el empleo de un sensor térmico de fibra óptica¹⁻⁵.

Se propone la implementación de un convertidor de IR a visible puramente óptico, es decir, que no requiere elementos mecánicos o la construcción de componentes electrónicos sofisticados ni costosos para su operación. Es interés de este estudio determinar la factibilidad de su implementación.

Contenido.

Un convertidor de IR a visible es de gran utilidad en la generación de imágenes térmicas y termografías. En el capítulo 1 proporcionamos un marco de referencia teórico sobre la obtención de imágenes térmicas y termografías por diferentes métodos. Además, presentamos un panorama sobre la tecnología empleada actualmente en la detección de IR. Así mismo, en este primer capítulo se plantea el funcionamiento del convertidor propuesto.

En el capítulo 2 presentamos una revisión referente al estado del arte de los convertidores de IR a visible. La revisión es amplia e incluye tanto artículos como dispositivos patentados en los últimos 20 años.

En el capítulo 3 empleamos el método de diferencias finitas para evaluar la resolución espacio-temporal en un sensor de temperatura de fibra óptica utilizado como convertidor de luz infrarroja en visible. El modelo analiza la transferencia de calor en tres dimensiones en estado transitorio de la radiación absorbida. Encontramos la distribución de temperatura como respuesta a densidad de potencia incidente en forma localizada y constante y en forma de pulso para fibras con y sin sumidero térmico. Gracias al modelo térmico fue posible determinar la resolución espacial y temporal teóricas del dispositivo.

Por último, en el capítulo 4 se reportan una serie de experimentos para determinar el comportamiento de fluorescencia radial para diferentes isotérmicas. Inicialmente, se verificó la capacidad del convertidor propuesto para relacionar la información dependiente de IR en información en el visible. Posteriormente, se caracterizó la fibra para obtener los valores de sensibilidad, resolución, relación señal ruido, así como para verificar su linealidad. Por último se propuso un método de calibración para dispositivo.

CAPÍTULO 1

MARCO DE REFERENCIA

En la actualidad existen numerosos dispositivos -por lo general muy costosos- 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.

Los vocablos “termografía e imagen térmica” son dos términos que en algunas ocasiones se emplean indistintamente. Ambas técnicas, sin embargo, poseen una diferencia entre ellas. Si bien es cierto que ambas generan imágenes en el visible a partir de la recolección de la energía térmica emitida por un objeto, permitiendo así que el usuario observe la escena, en una termografía se tiene la ventaja adicional de que dicha energía térmica es medida en forma precisa ⁶.

Para apreciar mejor los alcances del trabajo propuesto es conveniente contar con algunas conceptos relativos a la radiación infrarroja, las técnicas de termografía y obtención de imágenes en la región del infrarrojo, así como de su importancia debida al gran número de aplicaciones de alto impacto social, industrial y científico.

1.1 Infrarrojo.

A menudo la radiación infrarroja se relaciona principalmente con la radiación de calor o radiación térmica. El calor es la energía que un cuerpo posee debido al movimiento de las moléculas que lo componen. Éste puede transferirse de un cuerpo a otro mediante tres métodos: conducción, convección y/o radiación. La radiación infrarroja no es otra cosa que radiación electromagnética que transporta energía (calor) a la velocidad de la luz.

1.1.1 Radiación de cuerpo negro.

Como la temperatura es una medida del promedio de energía de las moléculas de un cuerpo (calor), cualquier objeto que posee temperatura emite radiación. Ésta se emite en función directa con la temperatura del objeto. Así, para un cuerpo “sin color”, esto es, un cuerpo que no absorbe ni emite radiación en alguna longitud de onda en particular, el espectro de radiación está determinado completamente por su temperatura. Este tipo de cuerpo es llamado cuerpo negro, y en tal caso su espectro de radiación puede determinarse teóricamente mediante la ecuación 1.1 llamada ley de Planck para la radiación de cuerpo negro

$$L(\lambda) = \frac{2 hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1} \quad (1.1)$$

Aquí, h es la constante de Planck

c es la velocidad de la luz

λ es la longitud de onda en metros

k es la constante de Boltzmann

T es la temperatura absoluta en grados kelvin.

En la figura 1.1 puede apreciarse la radiancia espectral $L(\lambda)$ en función de la longitud de onda y la temperatura.

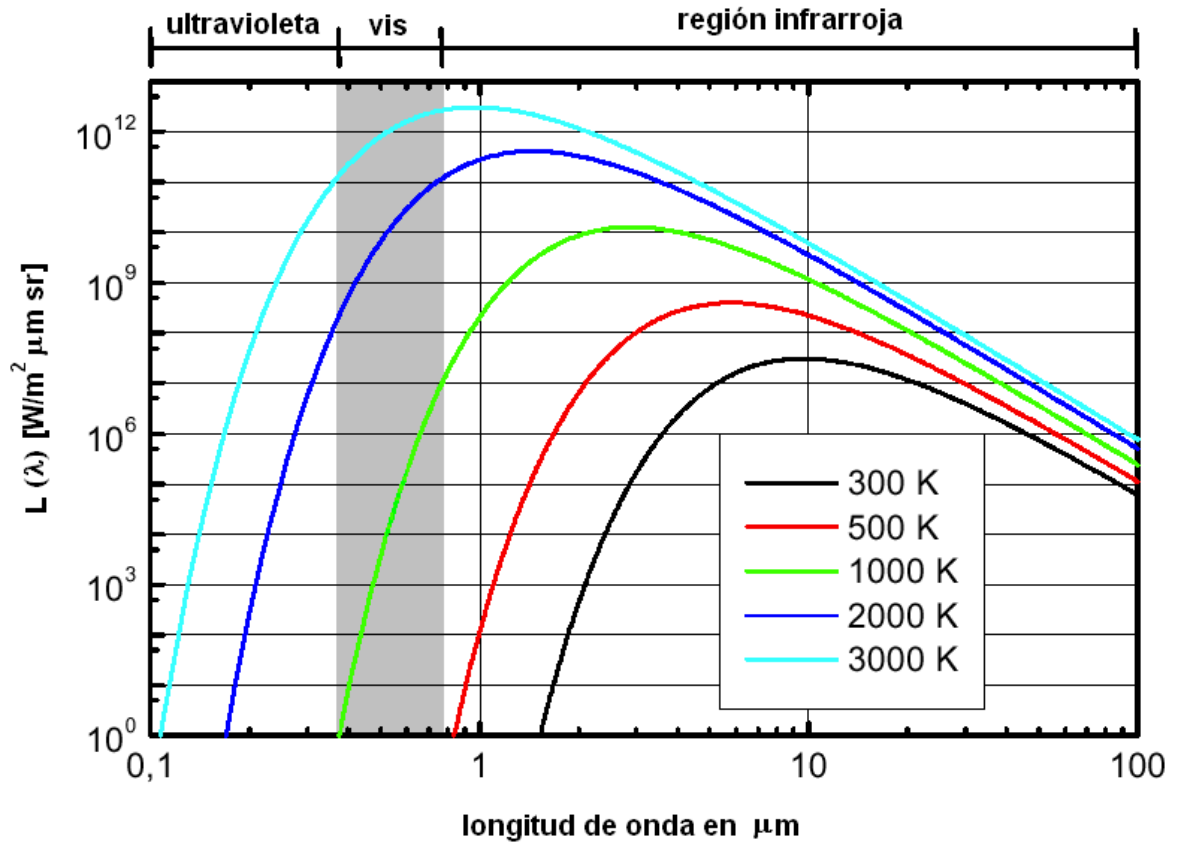


Figura 1.1 Radiación de cuerpo negro.
(fuente: www.perkin-elmer.com)

Como puede notarse, el hecho de que las curvas no se intersecten nunca, indica que al conocer la radiancia en una longitud de onda específica es posible conocer la temperatura del objeto. Al incrementarse la temperatura, la radiancia en cada

longitud de onda se incrementará también, Por lo tanto, es posible encontrar la temperatura al medir la radiancia total emitida. Dicha medición puede realizarse con precisión mediante el empleo de instrumentos tales como radiómetros o espectrómetros. Sin embargo, a grosso modo, la medición también puede efectuarse mediante la vista. El ojo humano es sensible a radiación entre 0.38 y 0.75 μm . Este rango es llamado región visible. Un objeto a una temperatura superior a 700 K emitirá un parte considerable de su radiación en el extremo rojo de la región visible del espectro (tal como puede observarse en algunas parrillas eléctricas). Si el mismo objeto se calienta ahora a 1300 K su brillo será no solo más intenso, sino que además será de un color rojo más claro debido a la presencia de componentes espectrales amarillas y verdes. Objetos a temperaturas superiores a 6000 K parecerán blancos ante nuestros ojos debido a que ésta es la temperatura del sol y nuestros ojos se han adaptado a reconocer tal radiación como luz blanca.

No obstante, si el cuerpo se encuentra a una temperatura inferior a 700 K, el empleo de detectores sensibles a longitudes de onda mayores se vuelve obligatorio. En consecuencia, será necesaria la utilización de un detector sensible en la región infrarroja del espectro.

La región del infrarrojo se divide principalmente en tres zonas. Aunque los límites exactos entre cada una de ellas no están realmente definidos con precisión, es posible, en términos generales, hablar de las longitudes de onda y temperaturas

que corresponden a cada zona. En la tabla 1.1 se muestra la información correspondiente a las regiones del infrarrojo cercano, medio y lejano.

Región espectral	Rango de longitud de onda (micrómetros)	Rango de temperatura (grados Kelvin)
Infrarrojo cercano	(0.7~1) a 5	740 a (3000~5200)
Infrarrojo medio	5 a (25~40)	(92.5~140) a 740
Infrarrojo lejano	(25~40) a (200~350)	(10.6`18.5)a (92.5~140)

Tabla 1.1 Regiones del infrarrojo.

(fuente: <http://www.ipac.caltech.edu/Outreach/Edu/Regions/irregions.html>)

1.1.2 Detectores.

Generalmente, se necesitan diferentes detectores para registrar radiación en las distintas regiones del espectro. Los detectores de infrarrojo (como cualquier otro detector de radiación) convierten el flujo incidente de fotones en una señal eléctrica y pueden ser de dos tipos: Térmicos y cuánticos. Un **detector térmico** absorbe energía que al incrementar su temperatura modifica alguna variable física (por ejemplo su resistencia eléctrica) que se asocia con una señal. Por lo general este tipo de detector posee una superficie receptora completamente negra por lo que es sensible a un gran rango de longitudes de onda. Por otra parte, los **detectores cuánticos**, detectan la radiación de una manera distinta. El tipo de detector cuántico más empleado se compone de un cristal semiconductor. En él, un fotón interactúa con un electrón ligado a la estructura del cristal. Si la energía del fotón es lo suficientemente grande, ésta será transferida al electrón excitándolo

de la banda de valencia a la de conducción. Durante el tiempo en el que dicho electrón se encuentre libre, antes de regresar a su estado ligado, será capaz de generar una señal eléctrica. De esta manera, los detectores cuánticos se comportan básicamente como contadores de fotones y son igualmente sensibles a todos aquellos fotones con la energía mínima necesaria para liberar a un electrón ligado. Desde luego, el valor mínimo de dicha energía es variable de un material a otro.

Los detectores cuánticos generalmente poseen una respuesta temporal más rápida que sus equivalentes térmicos. En la figura 1.2 se aprecia la respuesta espectral relativa de algunos detectores.

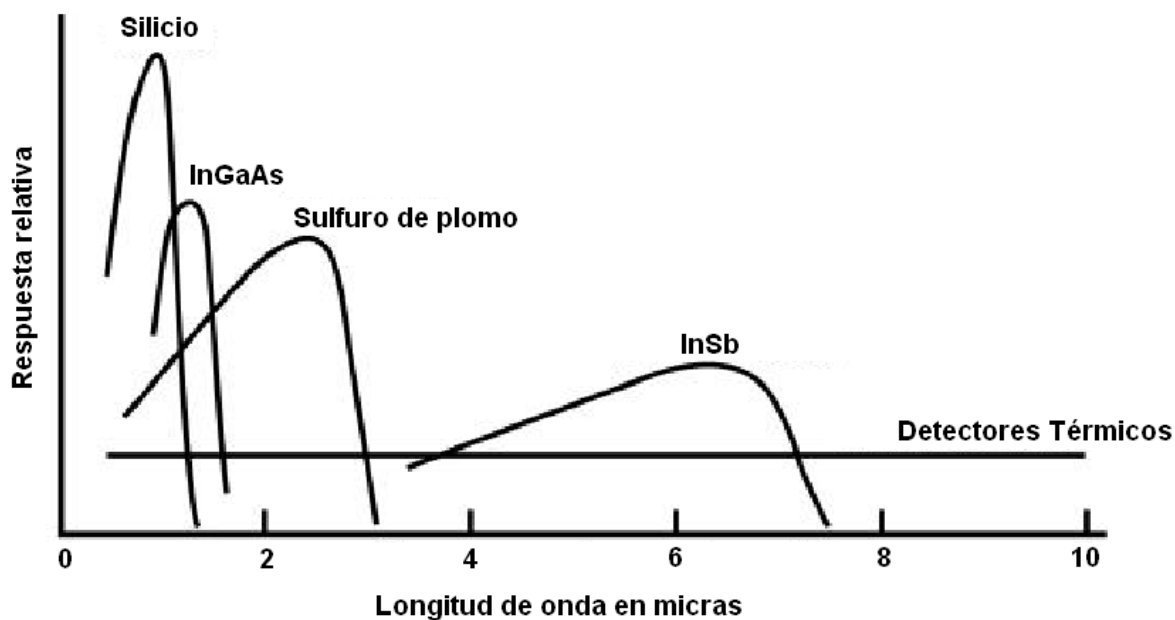


Figura 1.2 Respuesta relativa de algunos detectores.

Dentro de las ventajas de los detectores térmicos se encuentra la pequeña dependencia entre la responsividad (razón entre la fotocorriente de salida del

detector [A] contra la potencia óptica incidente [W]) y la longitud de onda, así como la posibilidad de operar a temperatura ambiente. Por otra parte, son generalmente más económicos que sus contrapartes cuánticas y se usan frecuentemente en el rango de 1 a 100 μm . Sin embargo, la velocidad de respuesta y la detectividad (inverso de la NEP [W^{-1}], o potencia equivalente al ruido, donde NEP es la potencia óptica incidente mínima que puede ser detectable y que está en función del responsividad y el nivel de ruido) son menores que en el caso de los detectores cuánticos.

Existen al menos tres clases de detectores térmicos: microbolómetros, detectores piroeléctricos y termopares.

Los **microbolómetros** son esencialmente elementos resistivos que se basan en el cambio de su resistencia eléctrica en función de la variación de temperatura asociado con la absorción de IR. Estos detectores requieren una corriente que los ponga en operación, así como una fuente modulada de radiación infrarroja que genere un voltaje que varíe en el tiempo de acuerdo con la ley de Ohm. Los arreglos de microbolómetros se han convertido el centro de una buena parte de la investigación enfocada al desarrollo de detectores no enfriados.

El efecto **piroeléctrico** es exhibido por algunos materiales que presentan polarización eléctrica espontánea, es decir, que las caras opuestas de ciertas orientaciones cristalográficas muestran cargas opuestas en respuesta a cambios

de temperatura. Por lo tanto, un cambio en la temperatura ΔT (producido por la absorción de IR) causa un cambio transitorio en la distribución de carga superficial, lo que origina una corriente de desplazamiento que fluye a lo largo de un circuito externo conectado con el material piroeléctrico. La corriente generada es directamente proporcional al cambio de temperatura del material. Este tipo de detectores son de los llamados “pasivos”, puesto que no requieren un suministro de corriente para funcionar, disminuyendo considerablemente las fuentes de ruido.

Los **termopares** o termopilas son el tipo más viejo de detector infrarrojo y utilizan la fuerza termo-electromotriz generada entre dos tipos de materiales diferentes (ya sean éstos conductores o semiconductores). Los materiales son conectados entre sí por uno de sus extremos mientras que por el otro son conectados a un voltímetro. Cuando un cambio en la temperatura de la unión ocurre, una fluctuación en el voltaje será detectada por el medidor.

Por su parte, los detectores cuánticos se clasifican en intrínsecos y extrínsecos. Los detectores **intrínsecos** poseen un límite en la longitud de onda de la radiación que pueden detectar determinado por el valor inherente de energía necesaria para transferir un electrón de la banda de valencia a la de conducción. A su vez, éstos se dividen en:

A) Detectores fotoconductivos que cambian su conductividad cuando incide sobre ellos radiación IR y que poseen una alta responsividad y permiten procesar la señal en forma sencilla.

B) Detectores fotovoltaicos que generan una corriente eléctrica cuando incide sobre ellos radiación infrarroja, y que poseen una alta responsividad y rápida velocidad de respuesta.

Los fotodetectores **extrínsecos** son del tipo fotoconductivo, y su límite en la longitud de onda de la radiación que logran detectar está determinado por la concentración de impurezas en los substratos de Germanio o Silicio. La mayor diferencia entre los detectores intrínsecos y extrínsecos radica en su temperatura de operación, ya que, si bien los intrínsecos deben ser enfriados hasta temperaturas del nitrógeno líquido (~77 K), los extrínsecos deben ser enfriados hasta la temperatura del helio líquido (~4 K).

En la actualidad, los dispositivos que se emplean para la generación de termografías o en la adquisición de imágenes térmicas, son de dos tipos. Unos utilizan elementos sensores basados en alguno de los detectores de radiación mencionados anteriormente. Otros, se basan en alguna de las tecnologías de conversión de IR a visible existentes.

Como ya se mencionó, el propósito de este trabajo es presentar una alternativa novedosa a los métodos tradicionales de detección y despliegue en el visible de radiación IR por el método de conversión IR-visible. Por tal motivo, el capítulo 2 de este escrito está enfocado totalmente a la descripción de métodos de conversión IR-visible. No obstante, consideramos conveniente mencionar también algunos ejemplos de los dispositivos que, mediante detectores térmicos o cuánticos, se emplean en la generación de termografías e imágenes térmicas.

1.1.3 Cámaras.

La empresa Infrared Solutions ⁷ comercializa dos tipos de cámaras (ambas operan a temperatura ambiente) para la región de 8 a 12 μm . Una de ellas (SnapShot – que se muestra en la figura 1.3-) emplea como elemento sensor un arreglo lineal de detectores termoelectrónicos (termopares), como el que se ilustra en la figura 1.4, fabricados con tecnología de la empresa Honeywell. El arreglo se compone de 120 píxeles de 50 x 50 μm distribuidos en una sola fila. Al mover esta fila de detectores es posible fabricar una imagen bidimensional. El tiempo de adquisición es de menos de 1.5 s y su diferencia de temperaturas equivalente al ruido (NETD) es de 0.1 °C @ 30 °C.



Figura 1.3 Cámara SnapShot.
(fuente: <http://www.infraredsolutions.com>)

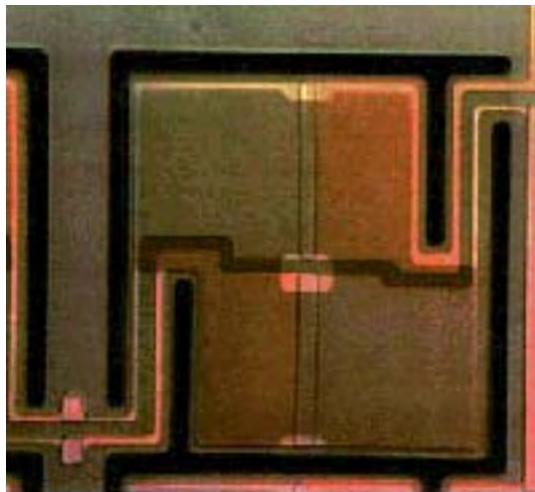


Figura 1.4 Elemento sensor (termopares) magnificado.
(fuente: <http://www.infraredsolutions.com>)

La otra cámara (IR-160 -que se muestra en la figura 1.5-) utiliza como elemento sensor un arreglo de microbolómetros, como el que se muestra en la figura 1.6, también fabricados por Honeywell. El arreglo consiste de 160 x 120 detectores individuales, centrados a una distancia de 51 μm . El tiempo de respuesta es de 12 ms y su NETD es de $<60 \text{ mK @ } 30 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figura 1.5 Cámara IR-160.
(fuente: <http://www.infraredsolutions.com>)

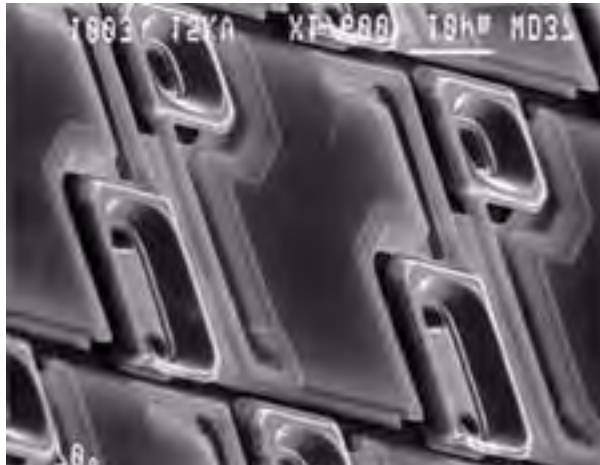


Figura 1.6 Elemento sensor (microbolómetro) magnificado.
(fuente: <http://www.infraredsolutions.com>)

Por otra parte, la empresa Indigo Systems⁸, ofrece diferentes cámaras para los rangos de infrarrojo cercano, medio y lejano.

En infrarrojo lejano (7.5 a 13.5 μm), la cámara Omega, que se exhibe en la figura 1.7, emplea un arreglo de microbolómetros que posee básicamente las mismas

características que su competidora IR-160 con la excepción de que su NETD es de $<40 \text{ mK @ } 30 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figura 1.7 Cámara Omega.

(fuente: <http://www.indigosystems.com/product/cameras.html>)

En infrarrojo medio ($3 - 5 \mu\text{m}$), la empresa ofrece la cámara Merlin-Mid, que se presenta en la figura 1.8, capaz de detectar cambios de hasta $0.018 \text{ }^\circ\text{C}$. Se compone de un arreglo de 320×256 detectores de InSb (Antimoniuro de indio, ilustrados en la figura 1.9) con un tamaño de $30 \times 30 \mu\text{m}$. Su tiempo de integración oscila entre los $5 \mu\text{s}$ y 16.5 ms , posee una NETD menor a 18 mK y debe operarse a 77 K mediante un enfriador de ciclo cerrado Stirling o mediante enfriamiento con nitrógeno líquido.



Figura 1.8 Cámara Merlin-Mid.

(fuente: <http://www.indigosystems.com/product/cameras.html>)

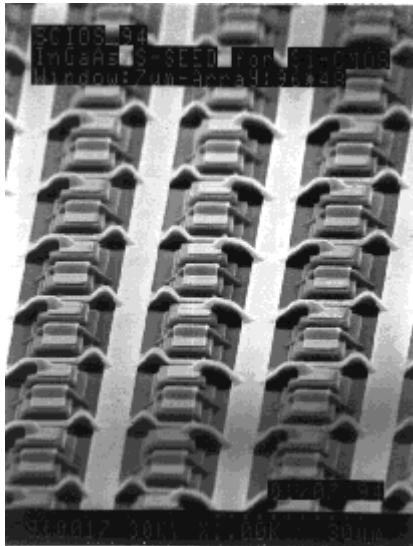


Figura 1.9 Elemento sensor (InSb) magnificado.

(fuente: <http://www.indigosystems.com/product/cameras.html>)

En infrarrojo cercano ($0.9 - 1.7 \mu\text{m}$), la cámara Phoenix-Near, que se muestra en la figura 1.10, emplea un arreglo de 640×512 (también hay versión de 320×256) de detectores de InGaAs (Arseniuro de Indio Galio) con un tamaño de $25 \times 25 \mu\text{m}$. El tiempo de integración es de $3 \mu\text{s}$ y su irradiancia equivalente al ruido (NEI) es de $1.5 \times 10^{-10} \text{ W/cm}^2$. El detector es enfriado mediante un enfriador termoeléctrico de efecto Peltier.



Figura 1.10 Cámara Phoenix-Near.
(fuente: <http://www.indigosystems.com/product/cameras.html>)

Ahora que se ya cuenta con un panorama mayor sobre el infrarrojo y algunos de los dispositivos empleados para su detección y despliegue, es posible hablar sobre termografías y sus aplicaciones.

1.2 Termografías.

La termografía infrarroja es una técnica empleada para visualizar una fracción del calor emitido por los objetos, al tiempo que se realiza una medición sin contacto de la temperatura de la superficie del objeto.

La técnica genera imágenes -llamadas termogramas- que muestran las fluctuaciones de temperatura en la superficie de los objetos. Las imágenes son generalmente en blanco y negro donde, típicamente, un píxel más brillante representa una mayor temperatura y viceversa. Como se muestra en la figura

1.11, a menudo la imagen es procesada digitalmente mediante la técnica de falso color para aportar una mayor cantidad de información al usuario.

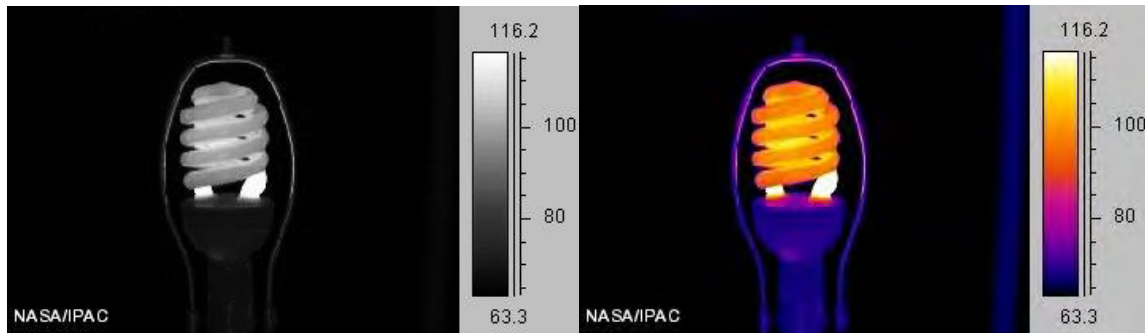


Figura 1.11 Falso color en el procesamiento de termografías.
(fuente: <http://sirf.caltech.edu/EPO/IRimages/index.html>)

La termografía posee un amplísimo rango de aplicaciones que van desde el diagnóstico médico y operaciones de búsqueda y rescate hasta la auditoría energética en construcciones y apoyo a la procuración de justicia.

En medicina, por ejemplo, como la examinación térmica del cuerpo humano no conlleva efectos colaterales, una de las aplicaciones principales es la de diagnosticar en forma temprana la formación de tumores y cáncer en la piel. Así mismo, se emplea en la detección de perturbaciones en el flujo sanguíneo y en el diagnóstico temprano de trombosis. Todo lo anterior se logra gracias a que los termogramas son capaces de mostrar ínfimas fluctuaciones en la temperatura de la piel del paciente. La figura 1.12 (a) ilustra el alto grado de simetría térmica presente en un cuerpo sano. Una leve diferencia en tal simetría indica la

presencia de una posible patología, tal como se exhibe en la figura 1.12 (b) la cual muestra un cáncer en la mama izquierda.

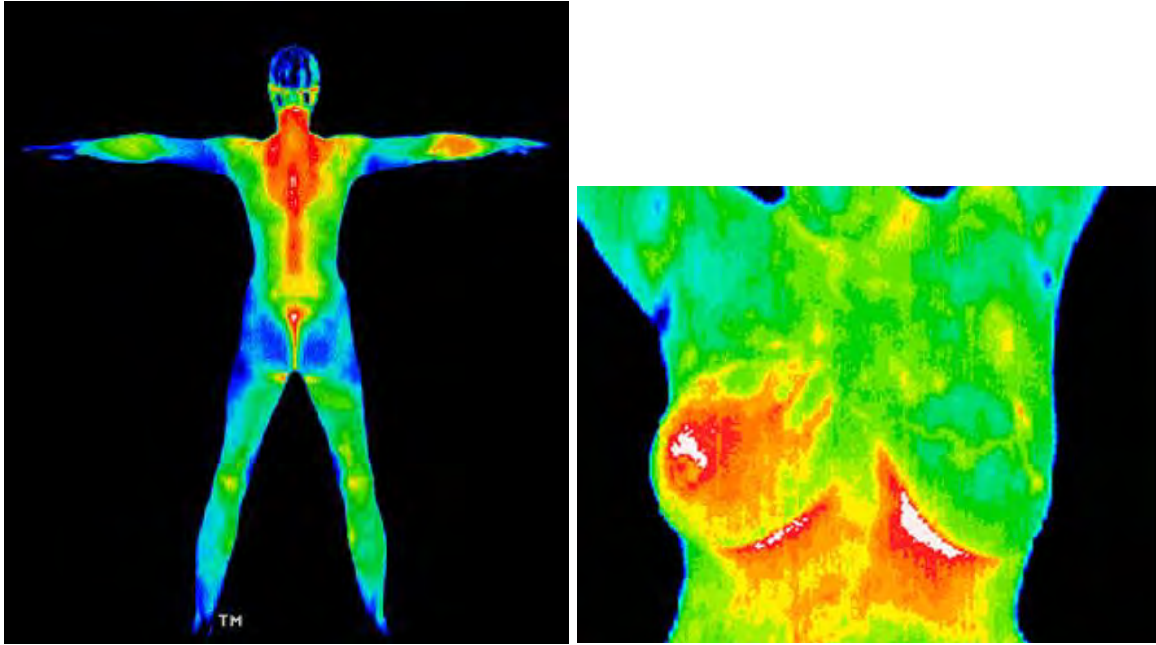


Figura 1.12 (a) Cuerpo sano térmicamente simétrico y (b) Cáncer de mama izquierda.

(fuente: <http://www.meditherm.com>)

El monitoreo térmico en construcciones por medio de la obtención, ya sea de termografías o sólo de imágenes térmicas, es otra de las aplicaciones con gran presencia en el mercado. Su función es la de detectar fugas de energía térmica debidas a una incorrecta colocación o avería de puertas, ventanas o aislante térmico entre las paredes y techos de un edificio. La correcta identificación de tales defectos supone un ahorro considerable de energía eléctrica y dinero, especialmente en regiones donde la aclimatación artificial del ambiente es forzosa. En las figura 1.13 se muestran termografías que señalan las fugas de calor en ventanas, techo, paredes y puertas respectivamente.

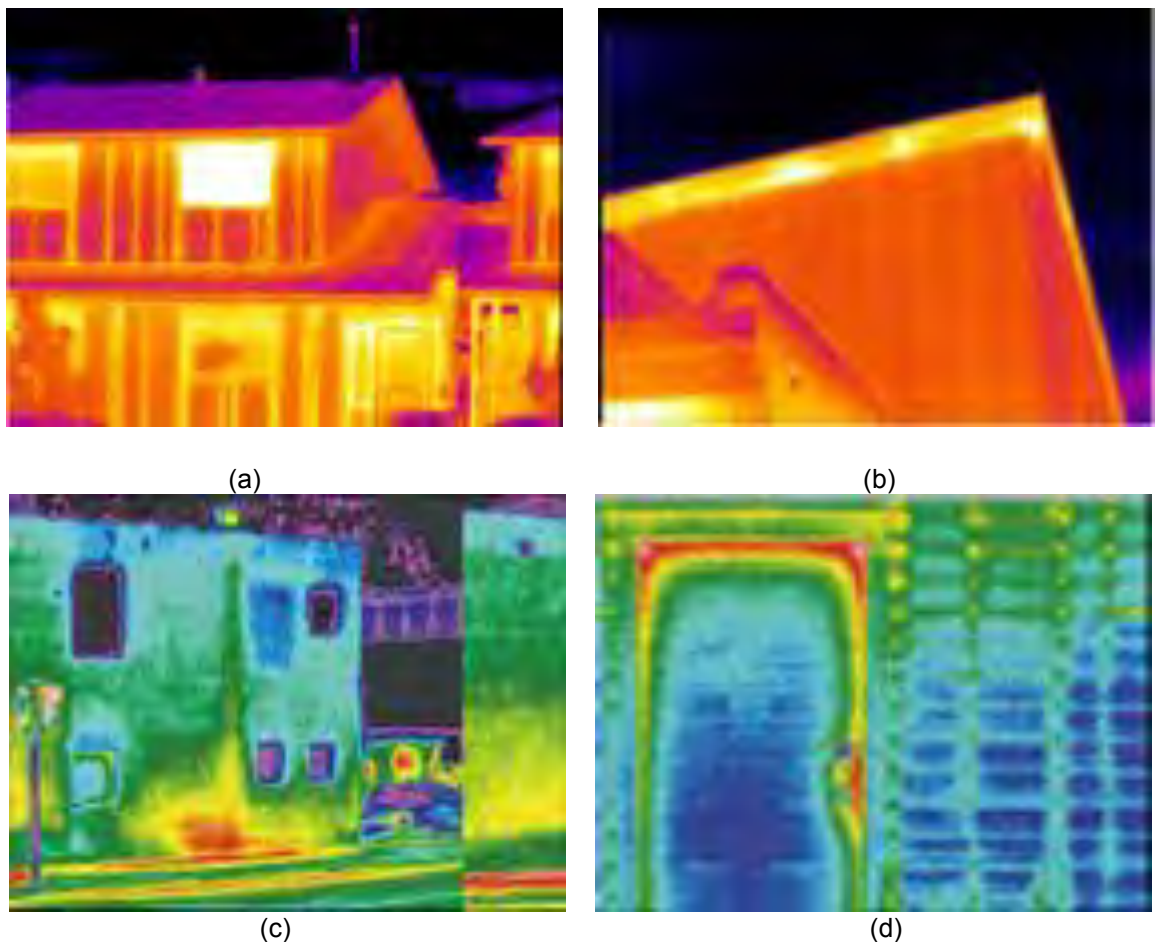


Figura 1.13 Fugas de calor en edificios en: (a) ventana, (b) techo, (c) paredes y (d) puerta.

(fuente: http://www.ebs-thermography.com/index_e.html)

Como se muestra en la figura 1.14, una aplicación más, consiste en el monitoreo de instalaciones eléctricas mayores como plantas generadoras, subestaciones, líneas de distribución y transformadores, así como en instalaciones menores como centros de carga, fusibles y cables. El objetivo es detectar fallas en las conexiones, desbalanceo de carga en las líneas y sobrecalentamiento. Mientras que una revisión de rutina en una subestación, por ejemplo, puede costar unos cuantos miles de pesos, una falla general (con la consecuente interrupción total

del suministro eléctrico) debida a la fusión de un cable sobrecalentado (de algunos cientos de pesos) puede costarle a la compañía generadora de energía eléctrica varios cientos de miles de pesos en daños.

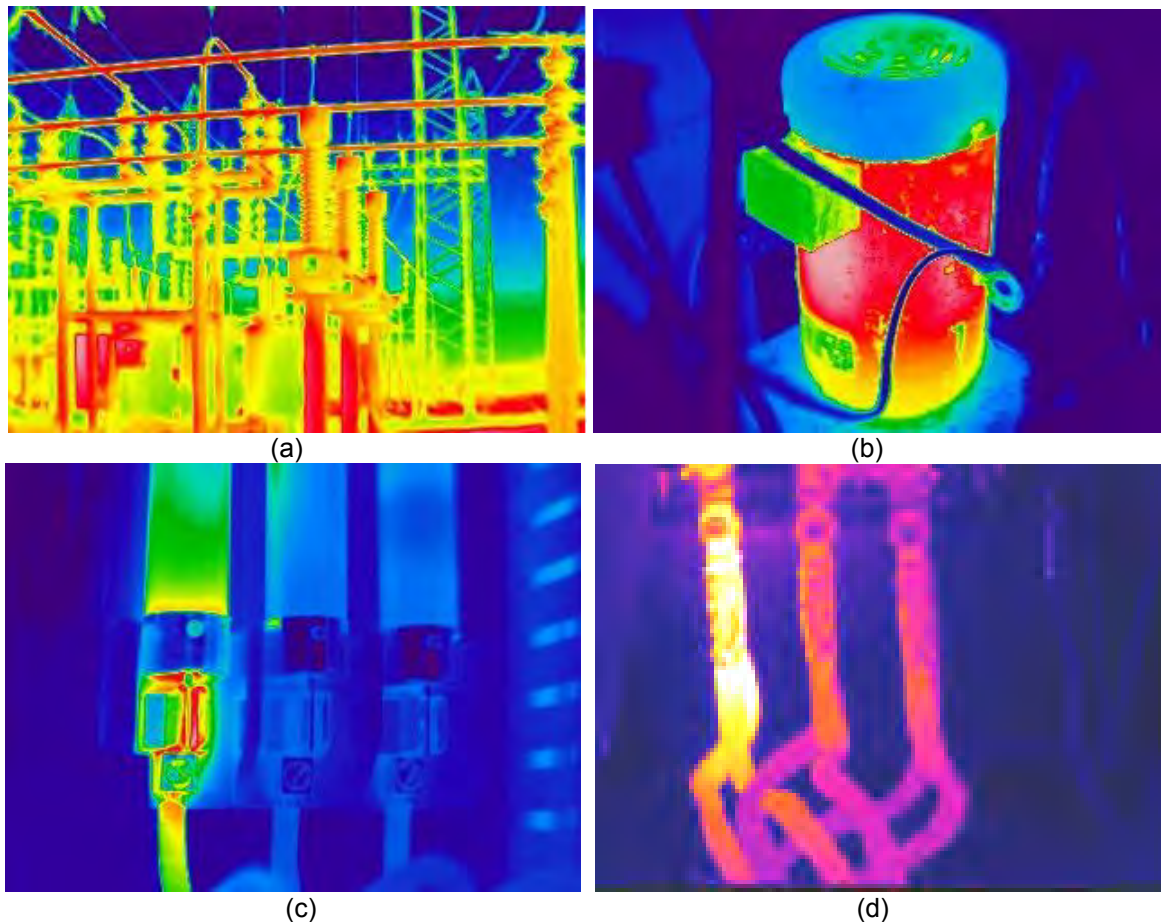


Figura 1.14 Monitoreo de equipo eléctrico: (a) subestación, (b) transformador, (c) centros de carga y (d) cables.

(fuente: http://www.ebs-thermography.com/index_e.html)

En el ramo de la metal mecánica, ambas técnicas se utilizan con el fin de caracterizar el comportamiento térmico de componentes sometidas a cargas dinámicas considerables, a fuerzas de fricción elevadas (como el disco del sistema de frenos de la figura 1.15) o a cargas intermitentes que puedan causar una fractura por fatiga (como la pieza de la figura 1.16). Una de las técnicas no

invasivas en la detección de micro grietas es aquella que emplea ultrasonido en conjunción con termografías. La pieza es sometida a vibraciones de alta frecuencia mediante un aparato de ultrasonido y posteriormente es monitoreada mediante un dispositivo capaz de obtener una imagen térmica de éste. La vibración produce que la zona agrietada eleve su temperatura. El termograma señala con gran precisión la existencia y localización de la micro grieta (figura 1.17).

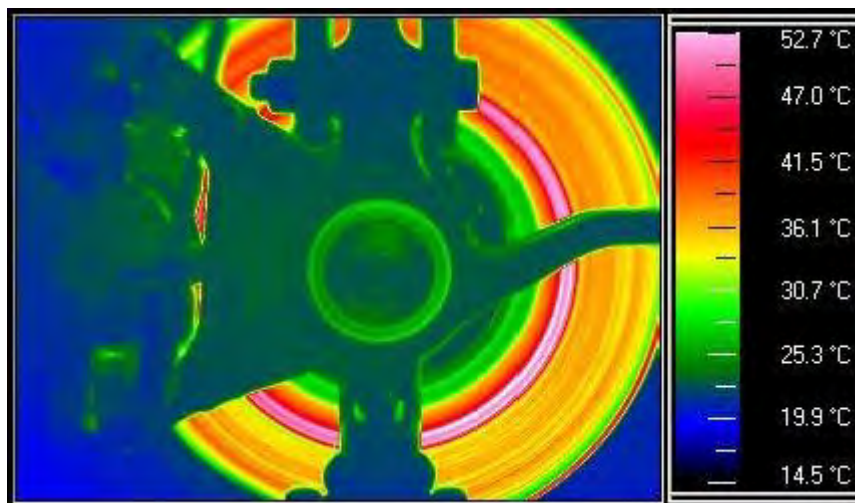


Figura 1.15 Termograma de un disco en un sistema de frenado.
(fuente: http://www.ebs-thermography.com/index_e.html)

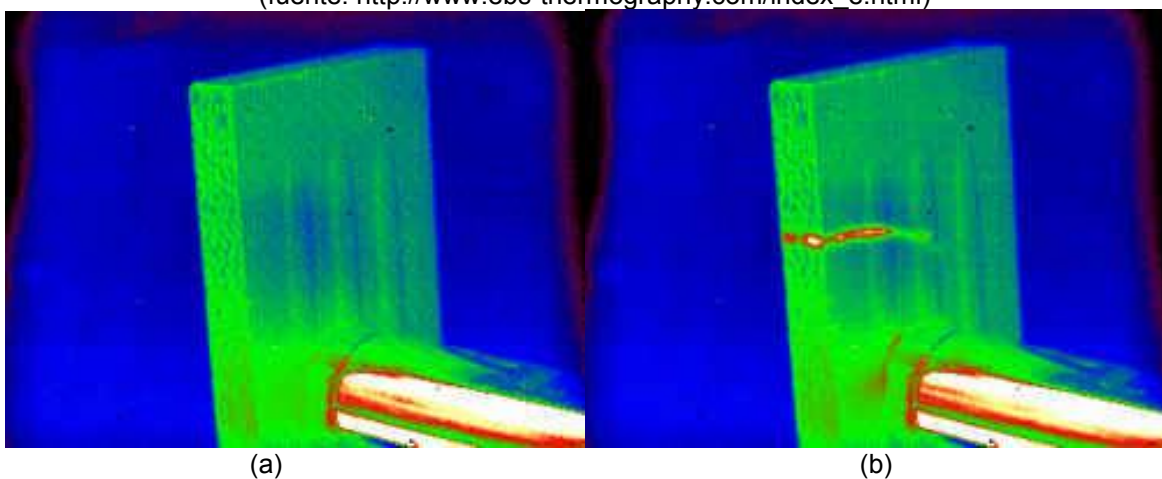
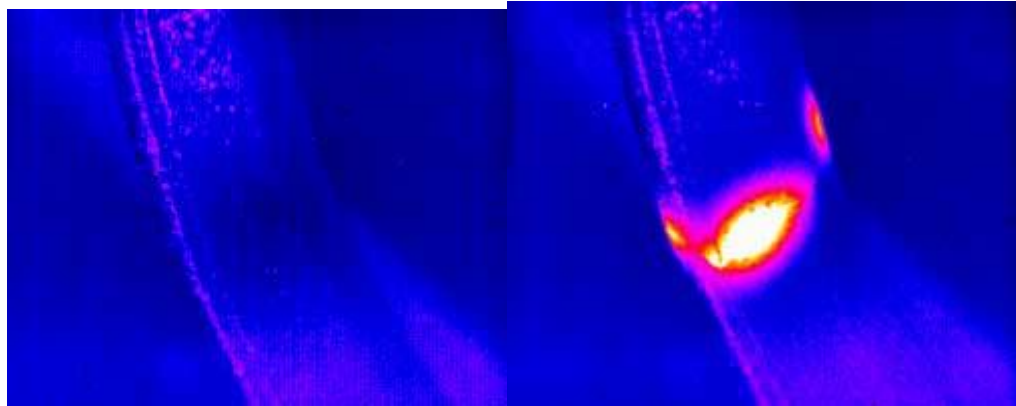


Figura 1.16 Termograma de una pieza sometida a fatiga. (a) sin fatiga, (b) con fatiga.

(fuente: <http://www.indigosystems.com/gallery/gallery.html>)



(a) (b)
Figura 1.17 Termograma de una micro grieta generado (a) antes y (b) después de someter la pieza a ultrasonido.

(fuente: <http://www.indigosystems.com/gallery/gallery.html>)

En la industria de procesos, también es frecuente el empleo de imágenes térmicas con la finalidad de detectar el estado de la frecuentemente compleja red de tuberías. En aquellas tuberías encargadas de transportar algún líquido a altas o bajas temperaturas, por lo general es de suma importancia el estado del aislante térmico. La formación de sarro en el interior provoca una disminución de la efectividad de dicho aislante. Una imagen térmica puede mostrar con facilidad tal evento (ver figura 1.18), permitiendo así que en la próxima ronda de mantenimiento general de la planta las piezas sean removidas.

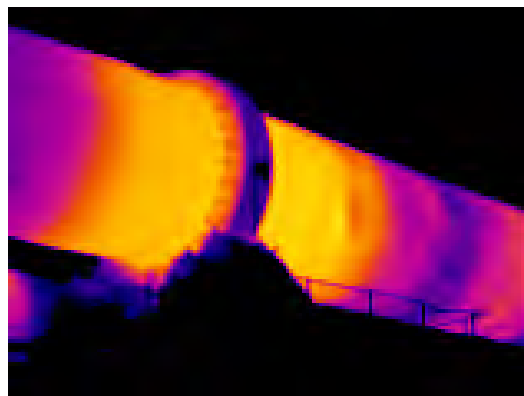


Figura 1.18 Termograma de una tubería con acumulación de sarro en la unión

(fuente: http://www.ebs-thermography.com/index_e.html)

La figura 1.19 muestra otras de las aplicaciones de ambas técnicas entre las que se encuentran el monitoreo en la temperatura de circuitos eléctricos impresos, la búsqueda y rescate de personas en incendios, y el monitoreo global de la temperatura por medio de detección remota.

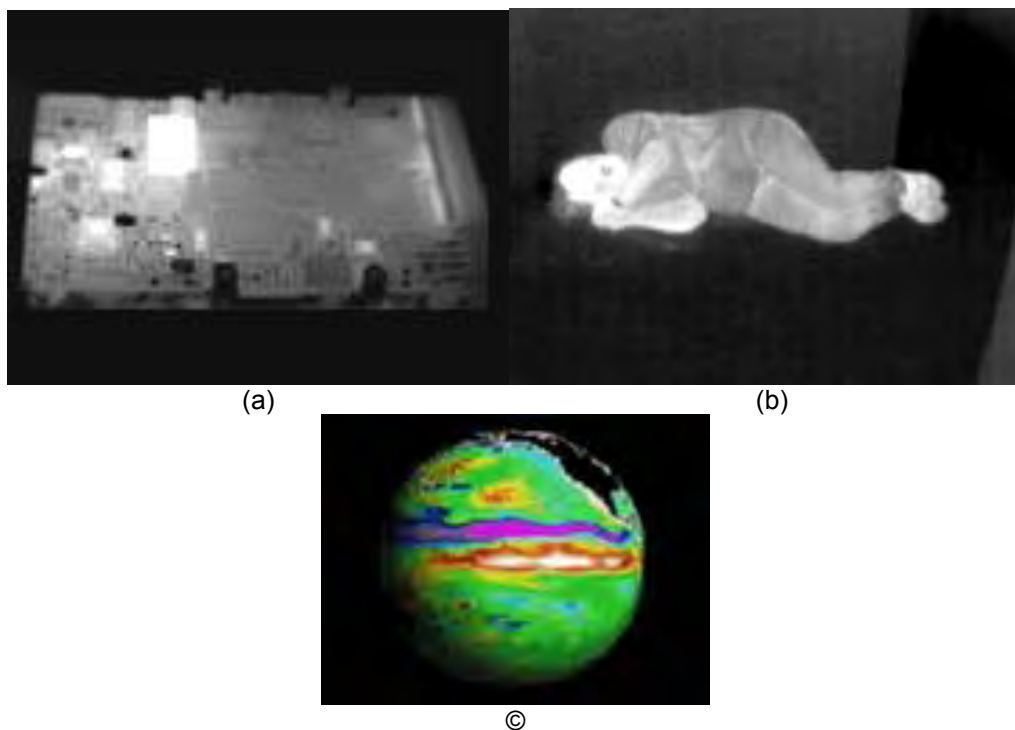


Figura 1.19 (a) Termograma de un circuito eléctrico, (b) Termograma de una persona por rescatar en un incendio y (c) Termograma de la tierra.
(fuente: <http://sirtf.caltech.edu>)

1.3 Convertidor IR a Visible.

Para la generación de termografías e imágenes térmicas se presenta en este escrito una propuesta novedosa que incorpora el empleo de fibra óptica de silicio dopada con alguna tierra rara realizar la conversión de infrarrojo a visible.

1.3.1 Fibra.

El empleo de fibras ópticas de silicio dopadas con alguna tierra rara, como por ejemplo erbio, como sensores de temperatura ha sido ampliamente reportado en la literatura ^{9,10}. Su utilización es posible gracias a que su espectro de emisión de fluorescencia es dependiente de su temperatura.

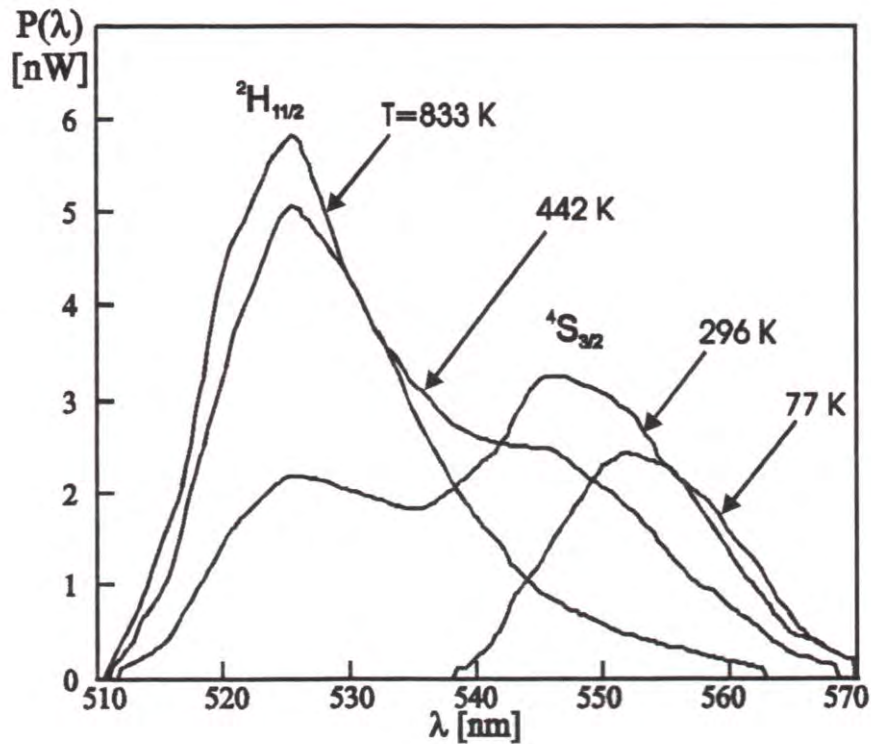


Figura 1.20. Espectro de emisión de fluorescencia de una fibra de silicio dopada con Er^{3+} .

(fuente: E. Maurice, G. Monnom, D. Ostrowsky, G. Baxter, "1.2 - μm transitions in erbium-doped fibers: the possibility of quasi-distributed temperature sensors" *Appl. Opt.* **34**, 4196-4199 (1995)).

Cuando una fibra de silicio (88% SiO_2 , 10% GeO_2 , 2% P_2O_5) dopada con erbio es bombeada con fotones de infrarrojo de longitud de onda cercana a los 800 nm, el nivel ${}^4\text{I}_{9/2}$ del erbio es excitado y el nivel metaestable ${}^4\text{I}_{13/2}$ es casi inmediatamente poblado mediante transiciones no radiativas. Este último nivel absorbe, a su vez,

fotones de bombeo que producen la excitación de otros dos niveles, el $^2H_{11/2}$ y el $^4S_{3/2}$, responsables de la emisión de radiación en las bandas del 520 nm y 550 nm en condiciones de temperatura ambiente.

En la figura 1.20 es posible observar el espectro de emisión de fluorescencia de una fibra de silicio dopada con erbio en función de su temperatura³.

La potencia P1 emitida en la banda centrada en 520 nm se incrementa al incrementarse la temperatura. A su vez, la potencia P2 emitida en la banda centrada en 550 nm decrece a medida de que la temperatura aumenta.

Se ha mostrado que la razón $[R(P_1/P_2)]$ de las potencias (P_1 y P_2) emitidas por la fibra es proporcional a la temperatura de ésta. Una vez caracterizada la emisión con respecto a la temperatura es posible construir un dispositivo sensor de temperatura. En las figuras 1.21 y 1.22 se aprecia la relación entre la razón de intensidades entre cuatro diferentes bandas de (10 nm) con respecto a la temperatura.

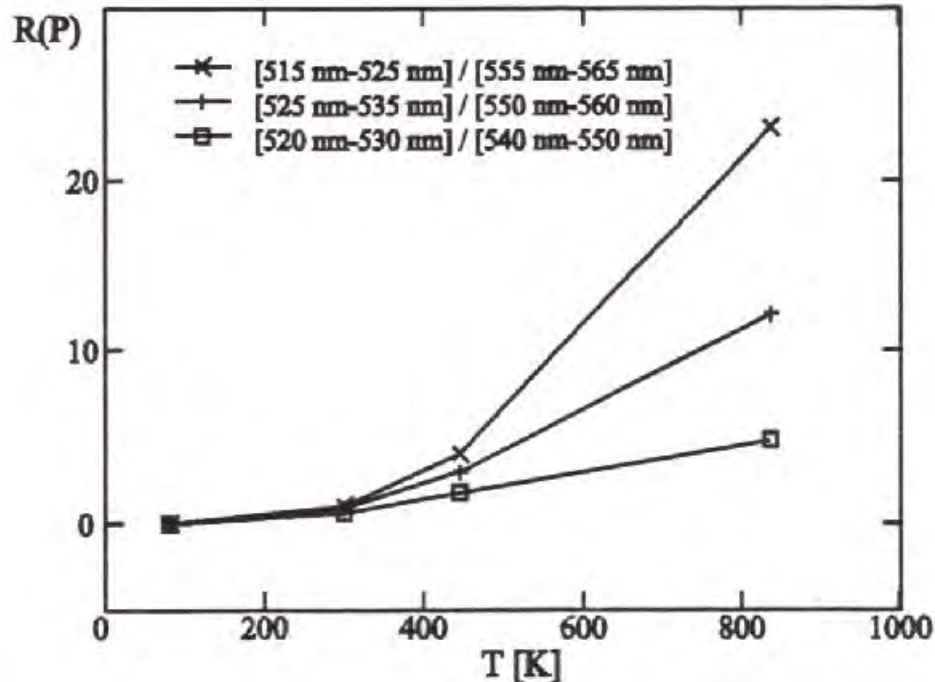


Figura 1.21 Razón de intensidades en dos bandas con respecto a la temperatura.
 (fuente: G. Paez, M. Strojnik, "Performance predictions of a Fiber Optic Temperature Sensor,"
Infrared Spaceborne Remote Sensing X, Proc. SPIE **4818**, 100-109 (2002)).

El convertidor de IR a visible que se propone en este escrito se fundamenta en el fenómeno de fluorescencia antes descrito. Al generar una imagen térmica en una superficie de detección -fabricada a partir de silicio dopado con erbio- se genera una distribución de temperaturas que contiene la información de la imagen. La superficie de detección se puede construir a partir de un arreglo de fibras ópticas de silicio dopadas con erbio. Así, la razón de intensidades de la emisión por fluorescencia en las dos bandas se encuentra determinada por la temperatura local en cada punto de la fibra. Al medir la razón local de intensidades se mide también la temperatura local en la fibra, posibilitándose la reconstrucción de la imagen térmica.

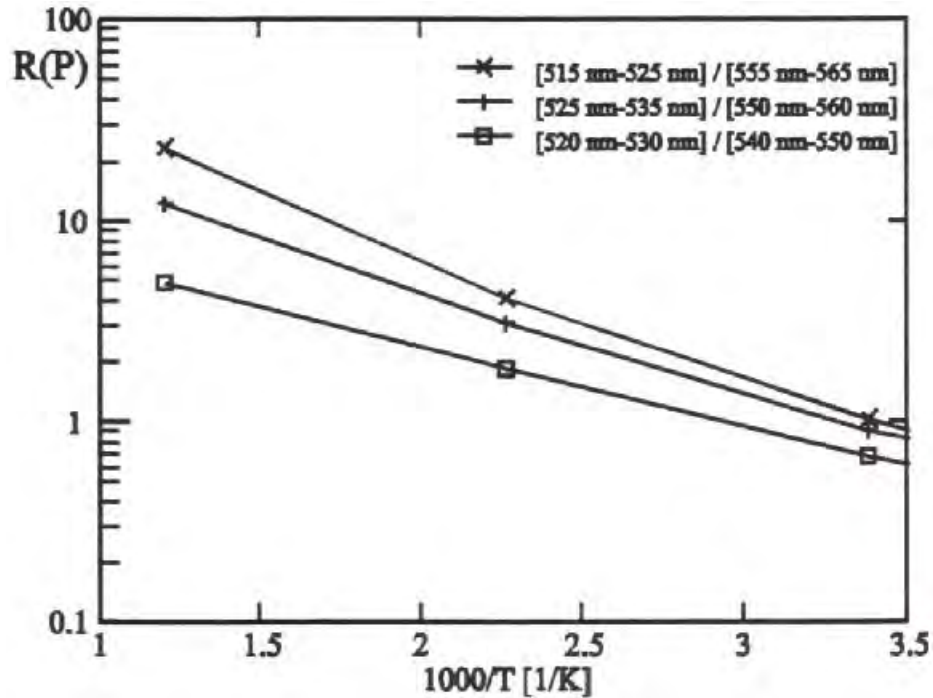


Figura 1.22 Razón de intensidades (en escala logarítmica) en dos bandas con respecto al inverso de temperatura.

(fuente: G. Paez, M. Strojnik, "Performance predictions of a Fiber Optic Temperature Sensor," *Infrared Spaceborne Remote Sensing X*, Proc. SPIE **4818**, 100-109 (2002)).

Uno de los primeros problemas que deben resolverse en la implementación del convertidor es el de encontrar su resolución espacial. La distancia mínima a la que podrán encontrarse dos puntos a lo largo de la fibra para poder resolver la diferencia entre la razón de intensidades entre ambos puede inferirse si se conoce el comportamiento térmico espacial y temporal de la fibra. La resolución (ver figura 1.23) se determina por la separación x entre los perfiles de temperatura generados en la fibra en dos puntos separados. Cada perfil se crea a causa del aumento de temperatura provocado por la transferencia de calor en forma radiativa desde el cuerpo al que se le busca tomar la imagen. Según el criterio de resolución de Rayleigh, para garantizar que ambos puntos sean resueltos es

necesario que, al menos, la altura a la que se intersectan ambos perfiles se aproxime al 74% de la altura total de ambos picos ¹¹.

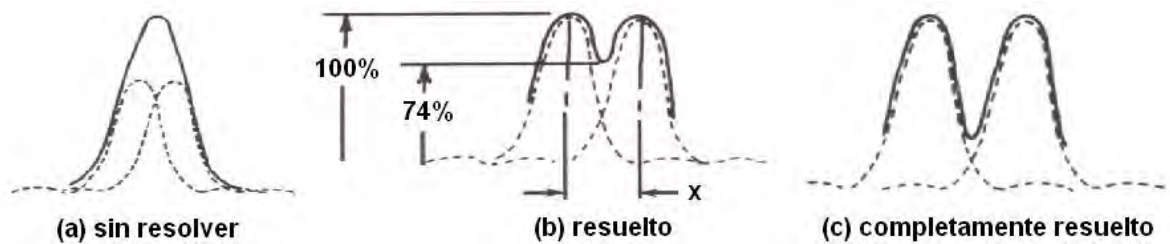


Figura 1.23 Criterio de resolución.

(fuente: W. Smith, *Modern Optical Engineering*, p. 162, (Mc Graw Hill, New York, 2000)).

Para encontrar la resolución espacial de la fibra se ha implementado un programa computacional que mediante el método de las diferencias finitas es capaz de predecir el comportamiento térmico de la fibra al ser ésta irradiada en dos puntos. El capítulo 3 de este escrito habla sobre el modelo térmico generado explícitamente para conocer la distribución de temperaturas al interior de la fibra.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo presenta una relación de diversos artículos y patentes vinculados con convertidores de radiación infrarroja a visible. Si bien la revisión de campo se enfocó inicialmente en el estado del arte de los últimos 3 años, ésta debió extenderse mucho más debido a que por una parte, al parecer hay escasez de métodos novedosos de conversión (atribuible probablemente al perfeccionamiento, miniaturización y abaratamiento de los microbolómetros) y por otra parte por que algunos métodos de conversión, que se encontraron en la literatura de hace 20 años, se relacionan con la técnica que actualmente perseguimos.

2.1 Método y aparato para detección de IR y formador de imágenes ^{12,13}.

El autor propone un sistema para convertir una imagen infrarroja en una visible mediante una película luminiscente cuya emisión en dos componentes espectrales depende de la temperatura, de forma que la intensidad en una componente aumenta con la temperatura mientras que la otra disminuye. La imagen infrarroja se extrae de la razón de intensidades de ambas componentes. La existencia de dos picos de emisión se debe a la presencia de dos diferentes materiales luminiscentes en la película (terbio Tb^{3+} y europio Eu^{3+}). Para que el fenómeno ocurra es necesario excitar la película bombeándola con luz ultravioleta. El dispositivo, que se muestra en la figura 2.1, se implementa como sigue: La

imagen infrarroja se proyecta sobre la película luminiscente, en donde es escudriñada (*scanned*) por medio de un punto de luz ultravioleta. La luminiscencia de la película es recolectada por una lente condensadora y separada por un espejo dicróico en sus componentes espectrales. Sendos fotomultiplicadores convierten cada señal y la envían hasta un procesador que obtiene la razón de intensidades a partir de la cual se alimenta un tubo de rayos catódicos que despliega la imagen. Debe señalarse que como todo el proceso anteriormente descrito se hace para cada elemento de resolución (pues todo parte del punto de luz ultravioleta que realiza un barrido sobre la película) las fluctuaciones en la homogeneidad de la película se cancelan puesto que la razón de intensidades en función de la temperatura es independiente de la intensidad de luz ultravioleta que recibe como radiación de excitación.

El autor no hace referencia a la resolución espacial de su dispositivo. Sin embargo sí menciona que el tiempo de despliegue de cuadro (*frame time*) es de aproximadamente 1 ms, lo que imposibilita su empleo en termografías de alta velocidad. Por otra parte otra desventaja más es el hecho de que el fenómeno descrito de emisión en dos picos espectrales dependientes de la temperatura sólo es eficiente a temperaturas inferiores a los 10 K.

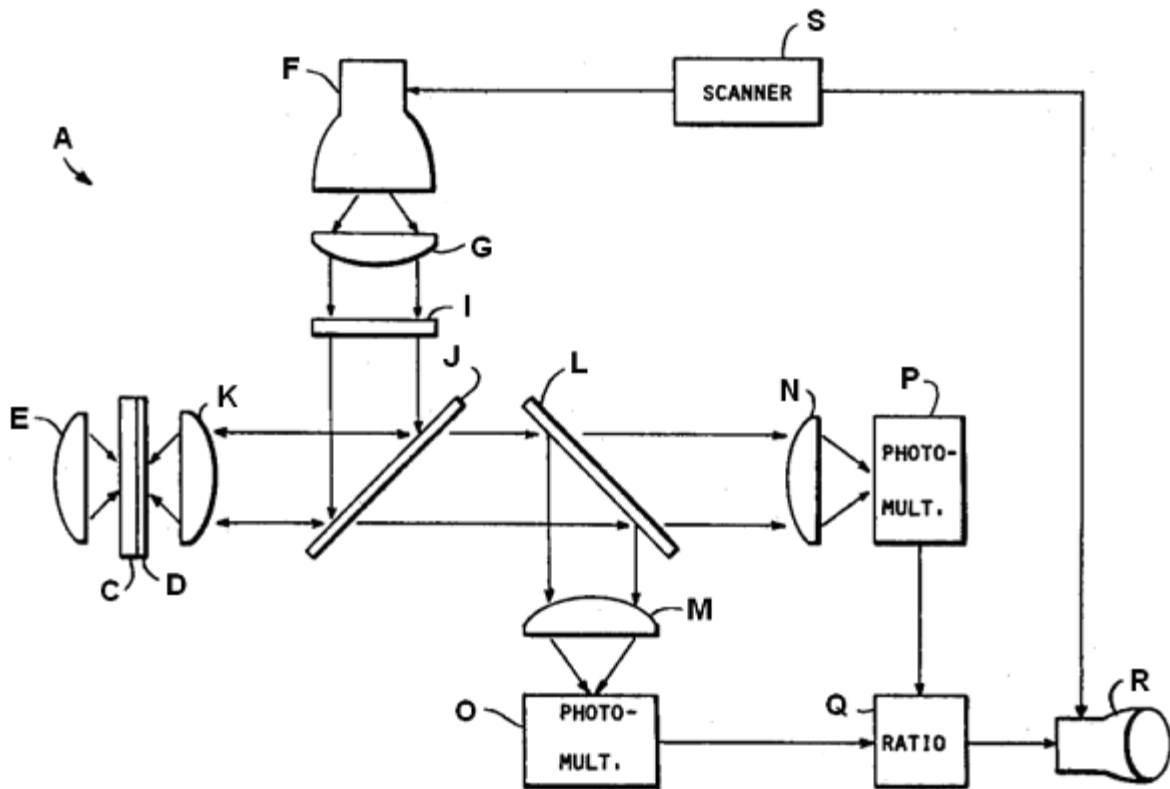


Figura 2.1 Sistema convertidor (A); Capa absorbente de IR (C); Película luminiscente (D); Lente infrarrojo (E); Escáner de punto volante (F); Lente (G, M, N); Filtro transmisor de UV absorbente de visible (I); espejo dicróico (J, L); lente condensadora (K); fotomultiplicadores (O, P); Medidor de razón señal (Q); tubo rayos catódicos (R); escáner (S) sincronizado con (F).
(fuente: M. Y. Kleinerman, "Infrared Image Converter," *Unites States Patent 3,639,735*, (1972)).

2.2 Conversión de imágenes de cercano infrarrojo a visible empleando una válvula de luz de cristal líquido de silicio ¹⁴.

En el artículo se reporta sobre el empleo de un convertidor de cercano infrarrojo a visible mediante el empleo de una válvula de luz de cristal líquido de la marca *Huges* (ver figura 2.2). El dispositivo consta principalmente de tres partes: un fotoconductor, un espejo dieléctrico y una capa de cristal líquido en fase nemática. Se emplea un láser de Nd:YAG ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$) para iluminar el patrón de la imagen en el lado del fotoconductor del dispositivo y láser de HeNe ($\lambda = 0.633 \mu\text{m}$) como

haz de lectura. En operación a temperatura ambiente, el semiconductor de óxido metálico es sometido a fases de acumulación (40 μ s) y agotamiento (0.5 ms). En la fase activa (agotamiento) el material p del semiconductor es agotado completamente, mientras que los pares electrón–hueco generados gracias a la incidencia de radiación infrarroja son barridos por el potencial aplicado. Se genera así un potencial espacialmente distribuido que activa al cristal líquido. Como el cristal líquido es birrefringente, la reorientación de sus moléculas causa retrasos en la fase de la luz monocromática linealmente polarizada empleada como haz de lectura. Un polarizador analizador completa la transformación de la imagen en un patrón bidimensional de intensidad de radiación visible que replica al patrón infrarrojo incidente en el fotoconductor. Por otra parte, en la fase de refresco (acumulación), los portadores minoritarios (electrones) son conducidos hacia la zona posterior del contacto del semiconductor donde se recombinan con los portadores mayoritarios (huecos). La resolución espacial del dispositivo se garantiza mediante el implante de un arreglo de microdiodos n - p de fósforo en la interfase del semiconductor. El objetivo del arreglo es “enfocar” los electrones en regiones específicas (definiendo así los elementos de resolución) al evitar que las cargas se dispersen a lo largo y ancho de la superficie del semiconductor y generen por consiguiente una imagen borrosa.

El arreglo es capaz de detectar radiación incluso a incidencias tan bajas como 100 μ W/cm², representando esto un gran avance comparado con la incidencia de 1 MW/cm² requerida con anterioridad en algunos otros métodos de conversión. Por

otra parte, el dispositivo opera a temperatura ambiente con una resolución no mayor a 35 líneas/mm, mientras que el tiempo de despliegue de cuadro “*frame time*” es menor a 15 μ s, lo que permite una conversión en tiempo real.

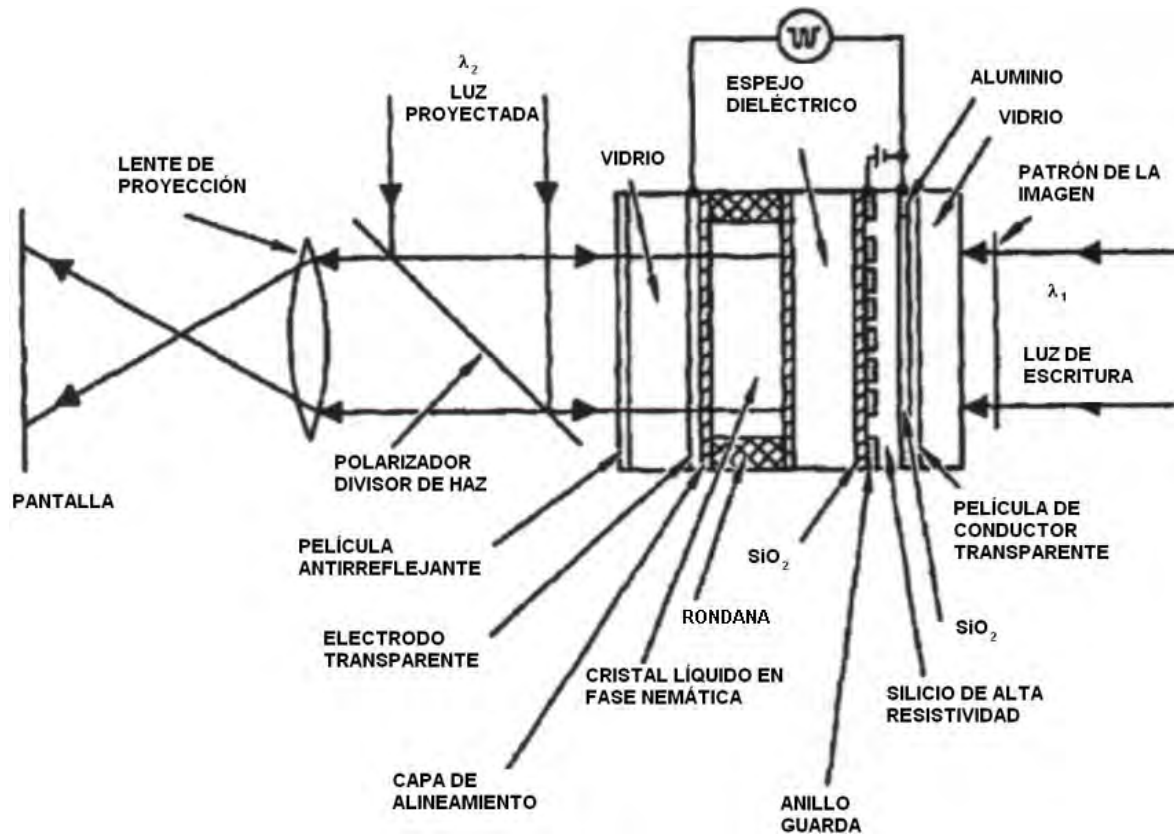


Figura 2.2 Convertidor de imágenes mediante válvula de cristal líquido.
(fuente: S. Tson, U. Efron, T. Hsu, “Near-infrared-to-visible image conversion using a Si liquid-crystal light valve,” Opt. Lett. 13, 13-15, (1988)).

2.3 Nuevo tipo de convertidor en tiempo real de imágenes de IR a visible: diseño y fabricación ¹⁵.

El artículo reporta el diseño de un nuevo convertidor de imágenes de IR a visible, que se ilustra en la figura 2.3, basado en modulación con cristal líquido. El dispositivo es sumamente simple ya que principalmente consta de un par de electrodos transparentes que contienen entre ellos una capa de cristal líquido y

otra de un material que cambia su resistividad local en función de la intensidad de radiación infrarroja que recibe (PbSe). En operación, cuando la radiación infrarroja atraviesa una serie de filtros y al electrodo transparente, y forma imagen sobre la capa de material sensible, la conductancia del material cambia localmente de acuerdo con la intensidad de radiación, modificando así el voltaje en los extremos del cristal líquido. De esta forma, el ángulo de inclinación y giro de las moléculas en fase nemática del cristal líquido, que están en función directa del voltaje aplicado, variarán de acuerdo con la distribución espacial de intensidad IR incidente en el material sensible. Como la capa de cristal líquido producirá efectos de birrefringencia, luz visible linealmente polarizada enviada desde el otro extremo del dispositivo, al ser reflejada, y después analizada con un polarizador, contendrá la información de la imagen en IR.

Los autores reportan que su dispositivo es capaz de resolver más de 301 líneas/mm con un tiempo de despliegue de cuadro menor a 5 μ s. Para obtener tan altas especificaciones fue necesario implementar un novedoso método de fabricación de la película de PbSe, así como adoptar una frecuencia de operación de 2KHz. En ningún momento se menciona si el arreglo requiere enfriamiento.

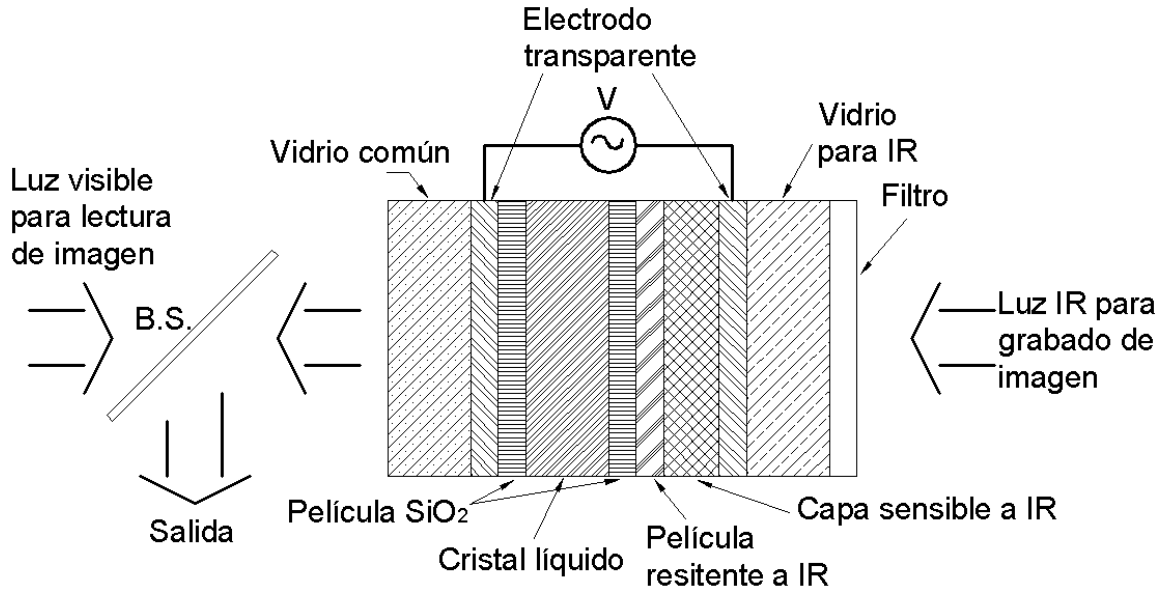


Figura 2.3 Convertidor en tiempo real de IR a Visible.

(fuente: 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)).

2.4 Medición del tiempo de decaimiento de luminiscencia por medio de una cámara CCD¹⁶.

Una videocámara CCD es empleada para la medición del tiempo de decaimiento de una señal luminiscente que contiene información sobre la temperatura de un objeto. En una parte de su trabajo, el autor propone el empleo de una película luminiscente para convertir la imagen en infrarrojo incidente en información en visible mediante el procesamiento de la señal de decaimiento (ver figura 2.4). La película es iluminada en forma intermitente con luz en una longitud de onda conocida que favorece la emisión luminiscente del material. La iluminación es intermitente debido a que es necesario acoplar la emisión de la película con la frecuencia de adquisición de la cámara. La forma de la señal emitida por cada región de la película (es decir la forma de la curva de decaimiento) contiene

información inequívoca sobre el incremento de temperatura sufrido para la película debido a la incidencia de radiación infrarroja. Cada píxel de la cámara CCD integra señal y la transforma en una determinada cantidad de carga que es proporcional al tiempo de decaimiento. La señal analógica que sale de la CCD es procesada posteriormente en un chip que al analizar la información al envía a un monitor para que sea desplegada en tiempo real.

El autor señala que al emplear Orthoaluminato de Itrio activado con cromo como material luminiscente, el rango de temperaturas de operación puede ir desde los -200 °C hasta los 1800 °C, mientras que el tiempo de despliegue de cuadro (*frame time*) es de 4 ms (450 K) por lo que puede emplearse el método para convertir imágenes a frecuencias de video de 60 Hz. Por otra parte, la resolución espacial del dispositivo puede ser tan alta como la resolución de la CCD lo permita.

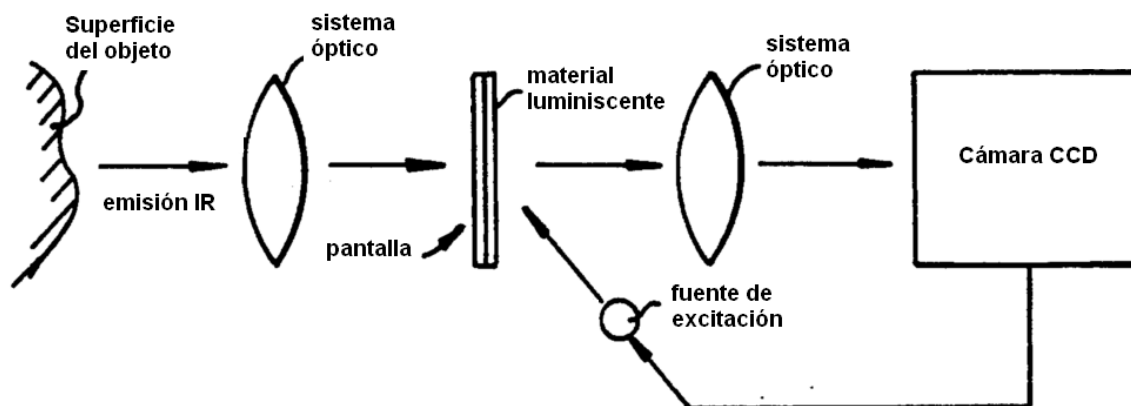


Figura 2.4 Convertidor por medición del tiempo de decaimiento.
(fuente: K. Wickersheim, "Luminescent decay time measurements by use of a CCD camera,"
Unites States Patent 5,304,809, (1994)).

2.5 Transformador de alta sensibilidad de imágenes infrarrojas al rango visible ¹⁷.

El autor propone tres nuevos procesos de generación de imagen basados en los efectos de *quenching* y de ganancia en la radiación secundaria visible de los así llamados “cristales perfectos” (CdS) cuando son irradiados en el infrarrojo medio y lejano. Por razones de espacio, sin embargo, el autor solo abunda en uno de los métodos, el basado en “*IR-quenching*” en el esparcimiento Raman debido a colisiones entre excitones ligados y libres. En ciertos cristales semiconductores, como los de seleniuro de cadmio, se ha observado que al hacer incidir radiación en UV se genera radiación estimulada en las líneas espectrales relacionadas con la emisión de excitones ligados. Dicha emisión es útil como fuente de bombeo para favorecer el esparcimiento Raman. Así, el espectro debido al esparcimiento contiene una componente de Stokes corrida con respecto a la línea espectral de excitación en una cantidad proporcional a la energía de excitación del excitón perteneciente a la impureza del complejo cristalino. Como lo excitones ligados se desestabilizan después de la ionización de la impureza el número de centros posibles para el esparcimiento Raman decrece después de ser iluminados con luz infrarroja. En otras palabras la emisión de las bandas en el visible (principalmente en verde) es atenuada en presencia de radiación infrarroja (*Ir-quenching*). En el arreglo experimental montado por el autor, la modulación en la intensidad de ciertas bandas fue de 20 a 70 veces, mientras que en una línea en particular (~493 nm) fue de hasta 1400 veces. Mediante esta modulación el autor propone la conversión de imágenes infrarrojas en visibles con un alto grado de sensibilidad.

2.6 Elemento fotosensible para un convertidor de imágenes de infrarrojo a visible¹⁸.

Los autores consideran el empleo de un material en forma de gel para registrar imágenes en infrarrojo las cuales, posteriormente, mediante un proceso puramente óptico, serán observadas en el rango visible del espectro. El gel empleado (persulfato de amonio con tetrametil-etildiamina), polimerizado en forma de película, posee la propiedad de expandirse cuando es irradiado con luz infrarroja. Lo anterior provoca que en la superficie se genere una imagen en relieve. Dicha imagen es casi imperceptible a simple vista debido a que las alturas en el relieve son del orden de 1 μm . Se emplea una técnica de fondo oscuro (con luz blanca) para facilitar la visualización.

En el arreglo experimental, que se muestra en la figura 2.5, la radiación proveniente de un láser de CO_2 ilumina una delgada lámina de metal perforada, cuya imagen es formada en la película de gel. Para efectos de visualización, la imagen de esta última es proyectada en una pantalla después de ser iluminada desde atrás por una fuente de luz blanca. La imagen formada en el material desaparece después de un cierto tiempo. Para cuantificar la profundidad del relieve se toman interferogramas del medio fotosensible después de cada exposición. Para ello un arreglo interferométrico de Mach-Zehnder es colocado en serie con el experimento. Con este arreglo, los autores fueron capaces de registrar imágenes con una resolución espacial de hasta 2 líneas/mm, con un tiempo de despliegue de cuadro de más de 2 segundos.

Debe rescatarse que el arreglo, aunque lento y de poca resolución espacial, no requiere electrónica ni enfriamiento, a diferencia de otros métodos mucho mejores pero más complejos y costosos.

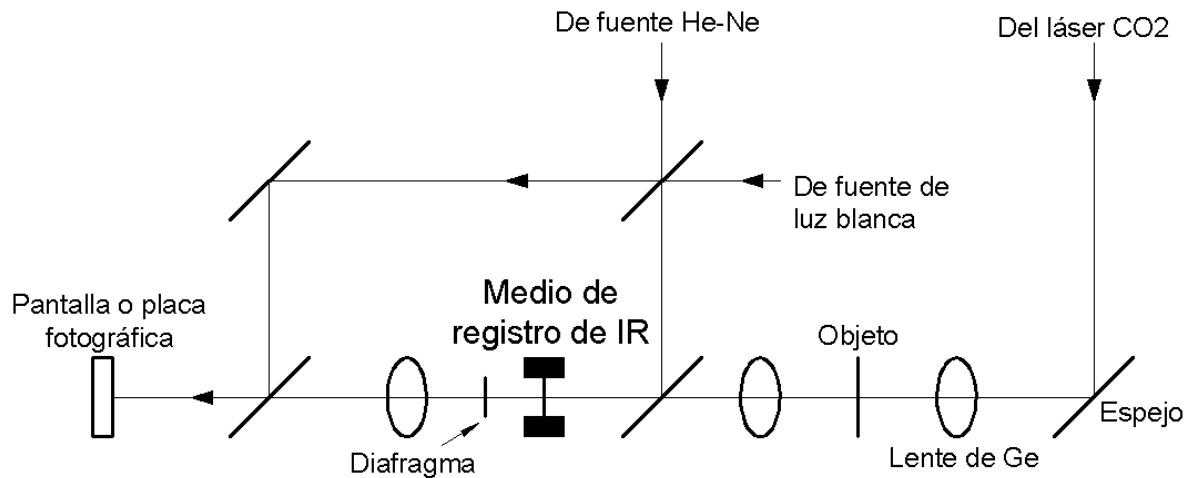


Figura 2.5 Convertidor interferométrico de IR a visible.
 (fuente: Sergio Calixto, Martín Salazar, Manuel Servin, "Photosensitive element for an infrared-to-visible image converter," *App. Opt.* **34**, 3589-3594, (1995)).

2.7 Convertidor de imágenes infrarrojas ¹⁹.

El dispositivo de la figura 2.6 se compone de un arreglo bidimensional de moduladores ópticos de pozo cuántico y de fotodetectores en infrarrojo (también de pozo cuántico) depositados en un sólo sustrato transparente al infrarrojo cercano. Cada modulador se encuentra integrado con el fotodetector, a la vez que ambos se conectan a un circuito electrónico el cual convierte la fotocorriente de los detectores en voltaje para los moduladores. Las variaciones en la intensidad de la radiación en el infrarrojo medio o lejano (según la aplicación deseada), registradas por los detectores son transformadas en variaciones en el voltaje aplicado a su modulador óptico respectivo. Tales variaciones modulan la intensidad y/o fase

(por reflexión) de la radiación en el infrarrojo cercano (878 nm) que ilumina a los moduladores.

El convertidor opera a una temperatura de 77K debido primordialmente a que los QWIP deben ser enfriados para generar suficiente contraste. El autor no hace referencia a la resolución espacial o temporal del arreglo.

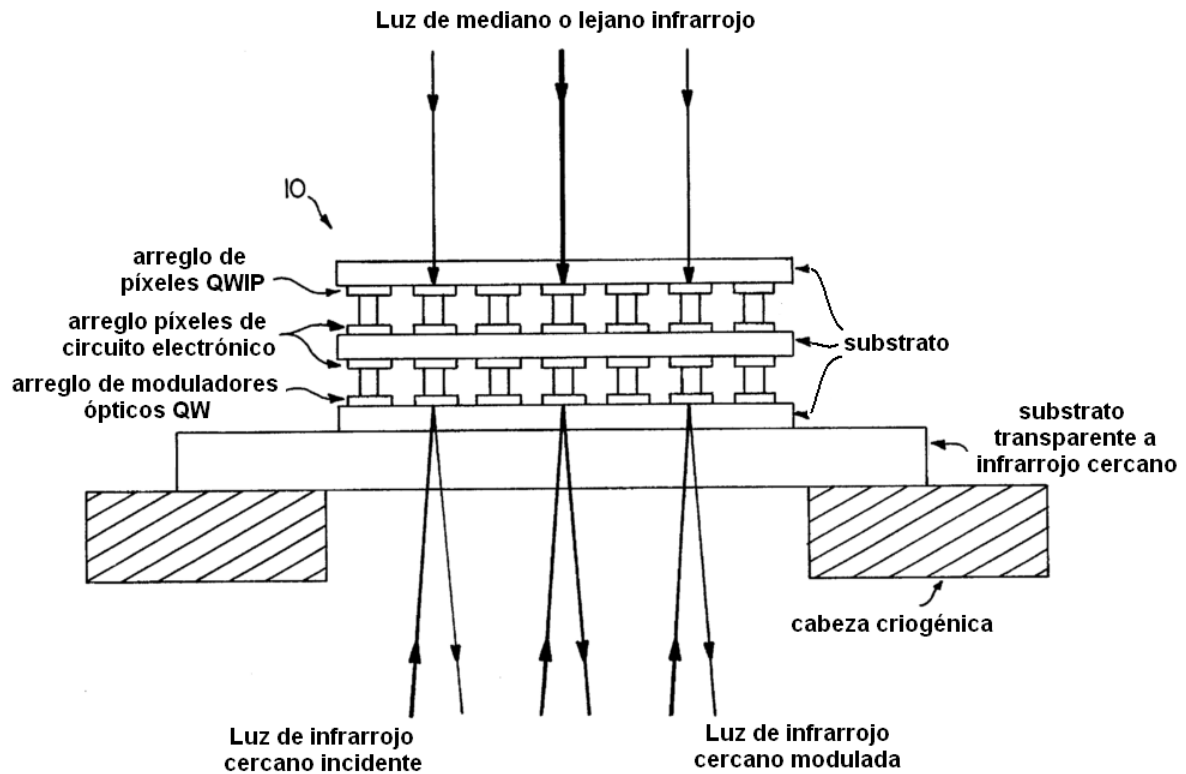


Figura 2.6 Convertidor de IR a visible mediante opto-moduladores.
(fuente: J. Ahearn, "Infrared image converter," *Unites States Patent 5,519,529*, (1996)).

2.8 Detección de imágenes infrarrojas resueltas espacial y temporalmente con un dispositivo semiconductor con descarga de gas^{20,21,22}.

Los autores presentan un método para la detección de imágenes en infrarrojo por medio de un dispositivo (ver figura 2.7) semiconductor que posee, entre el cátodo y el ánodo transparentes, una zona de descarga de gas. La operación del

dispositivo de la figura 2.8 se basa en la conversión de radiación infrarroja en luz visible en forma continua.

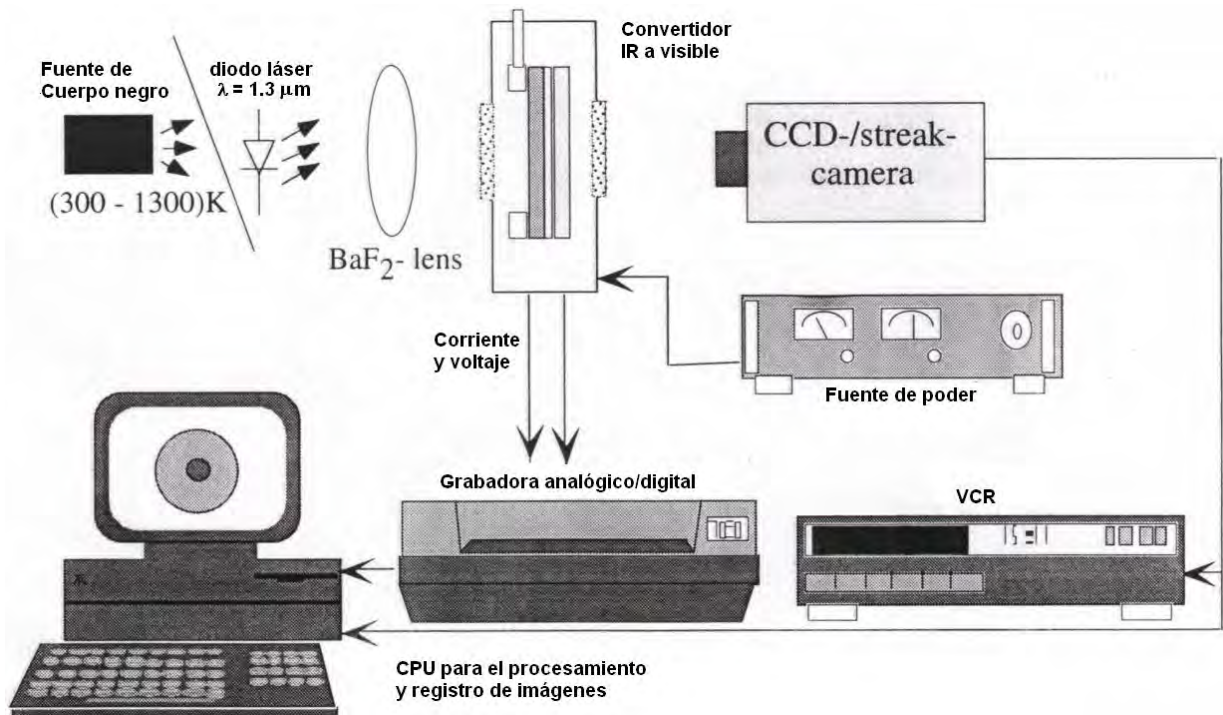


Figura 2.7 Esquema del sistema convertidor.

(fuente: H. Willebrand, Y. Astrov, L. Pportsel, 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)).

Un voltaje aplicado entre el cátodo (de material semiconductor) y el ánodo provoca la ruptura del dieléctrico en el interior de la zona de descarga lo que origina una corriente que cubre la totalidad de la superficie del electrodo emitiendo radiación visible. Cuando el semiconductor es enfriado a la temperatura del nitrógeno líquido, casi todos los portadores de la banda de conducción son mantenidos en la banda de valencia del aceptor. En este caso, el cátodo de semiconductor (en contraste con aquellos de metal) actúa como una capa de alta resistencia espacialmente distribuida. Cuando una distribución espacial no homogénea de

radiación infrarroja es proyectada en la superficie dopada del cátodo, se genera una modulación igualmente distribuida de la resistividad de dicha capa. En otras palabras, la resistividad local del semiconductor poseerá un mínimo donde la cantidad de radiación infrarroja incidente sea máxima. Como el voltaje aplicado se mantiene constante, una disminución local de la resistencia incrementará la corriente en la zona de descarga, y por ende, la emisión de luz. Así, cuando una imagen en infrarrojo es proyectada en la superficie del cátodo, su contraparte en visible aparece en forma de intensidad modulada dentro de la zona de descarga.

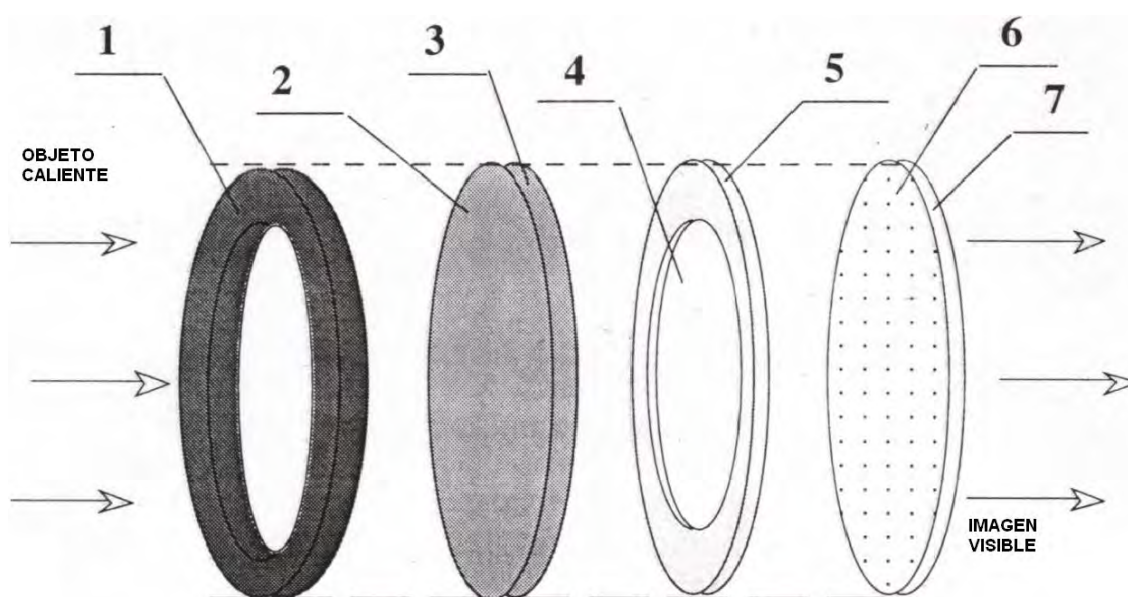


Figura 2.8 Esquemático de la celda de conversión: 1 anillo metálico enfriado con nitrógeno líquido; 2 Contacto de boro transparente al IR; 3 Electrodo fotoconductor; 4 intersticio (gap) de descarga de gas; 5 bobina dieléctrica; 6 capa transparente de óxido de estaño-indio; 7 placa de vidrio.

(fuente: 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)).

Los autores señalan que la resolución espacial de su dispositivo es de entre 50 y 100 μm , mientras que el tiempo de despliegue de cuadro (*frame time*) se encuentra en el orden de 1 μs . Por lo tanto, se plantea la posibilidad de emplear el convertidor como medio de observación de la distribución de temperatura en cuerpos calientes, y como detector de imágenes en infrarrojo de alta velocidad (100 KHz).

2.9 Dispositivo para conversión de imágenes de luz infrarroja en visible ²³.

La figura 2.9 muestra el dispositivo propuesto por el autor que se compone de dos etapas, un detector y un convertidor que se disponen en un solo sustrato. El detector incluye un arreglo de múltiples detectores de pozo cuántico de GaAs y GaAlAs. El convertidor está formado por un arreglo de LEDs de GaAsP. Una pantalla de fósforo despliega la imagen en el visible. El arreglo se construye en forma monolítica mediante la deposición sucesiva de múltiples capas de semiconductores detectores y emisores. Los detectores pueden ser ajustados para el rango de 9 a 11 μm o de 3 a 5 μm , mientras que los emisores emiten radiación en el rango entre 0.6 μm a 1 μm . Así, en forma directa, los fotones detectados en el infrarrojo medio son convertidos automáticamente en fotones emitidos en el rango del visible o cercano infrarrojo. Una superficie fotoemisiva, sensible a este último rango, es depositada sobre la última capa de LEDs. Los fotones incidentes sobre ésta liberan electrones que posteriormente son acelerados mediante un fuerte campo eléctrico para hacerlos incidir sobre una pantalla de fósforo dispuesta para tal fin. Debe señalarse que el dispositivo

presenta una ventaja considerable al prescindir de una etapa externa de procesamiento electrónico. Un inconveniente es que la temperatura de operación del dispositivo se encuentra en el rango criogénico. El autor no hace ninguna mención referente a la resolución espacial y temporal del arreglo.

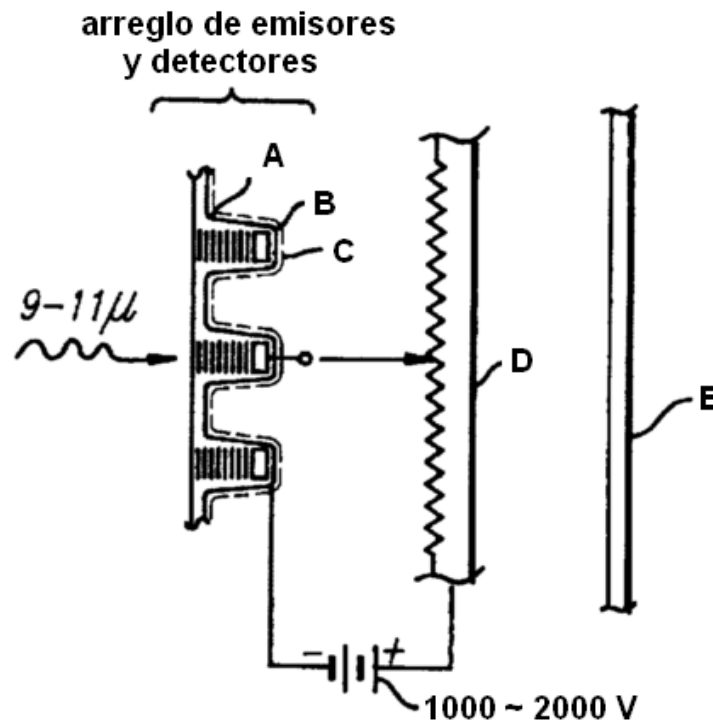


Figura 2.9 (A) capas inferiores de detectores de pozo cuántico sintonizadas en la región de 9 a 11 o 3 a 5 micrómetros; (B) capas superiores de semiconductor capaces de emitir en la región de 0.6 a 1 micrómetro; (C) superficie fotoemisiva sensible a la región espectral descrita en B; (D) pantalla de fósforo; (E) sustrato de vidrio.

(fuente: R. Hayes, "Infrared to visible light image conversion device," *Unites States Patent 5,703,363*, (1997)).

2.10 Sistema óptico para sensado de temperatura y radiación térmica infrarroja²⁴.

El autor, entre otros inventos, reclama la invención de un dispositivo capaz de convertir una imagen térmica infrarroja en una imagen visible (ver figura 2.10). Para ello se emplean guías de onda. A una primera guía que posee un índice de

refracción n_1 se le inyecta luz de prueba (*interrogating light*) de longitud de onda conocida. Ésta se encuentra en contacto con una segunda guía con índice n_2 menor a n_1 . El material de ambas es tal que el cambio en temperatura modifica las propiedades de transmisión de la luz en cuestión. La operación del dispositivo se basa en el hecho de que el índice de refracción de uno de los materiales cambia mucho más en función de la temperatura que el otro, (el coeficiente de temperatura de un material es mayor que el otro) lo que origina que un incremento de temperatura cause que una fracción de la radiación que viajaba por una de las guías de onda salga de ella y viaje por la otra. Una de las guías de onda puede contener disuelta alguna tierra rara como dopante para generar una emisión en el visible. Posteriormente, se analiza la razón de intensidades entre la luz que viaja por una guía y la otra para cuantificar el incremento de temperatura sufrido por ambas.

El convertidor de imágenes infrarrojas a visible se implementa como sigue: Una película delgada de un material con índice de refracción n_1 (guía 1) se encuentra en contacto con una segunda película de índice $n_2 < n_1$ (guía 2), recubierta a su vez por una película de algún material fotoluminiscente. El coeficiente de temperatura del material con índice n_2 también es menor que el de n_1 . La guía 1, por la otra cara, se encuentra en contacto con una tercera película de índice $n_3 < n_2$ (guía 3) la cual posee un recubrimiento que incrementa notablemente la absorción de IR. Luego, luz de una longitud de onda conocida se hace viajar en forma uniforme como luz de prueba (λ_1) en la guía 1. Cuando se proyecta la

imagen infrarroja en el dispositivo, se crea una distribución de temperaturas bidimensional. Ésta es producida por el incremento de temperatura local en función de la intensidad de radiación λ_2 . En cada punto en la que la radiación incrementa la temperatura, una fracción de la luz que viajaba por la guía 1 se transfiere hacia la guía 2 desde donde es deflectada hacia el recubrimiento fotoluminiscente, y entonces emitida en forma de radiación visible λ_3 .

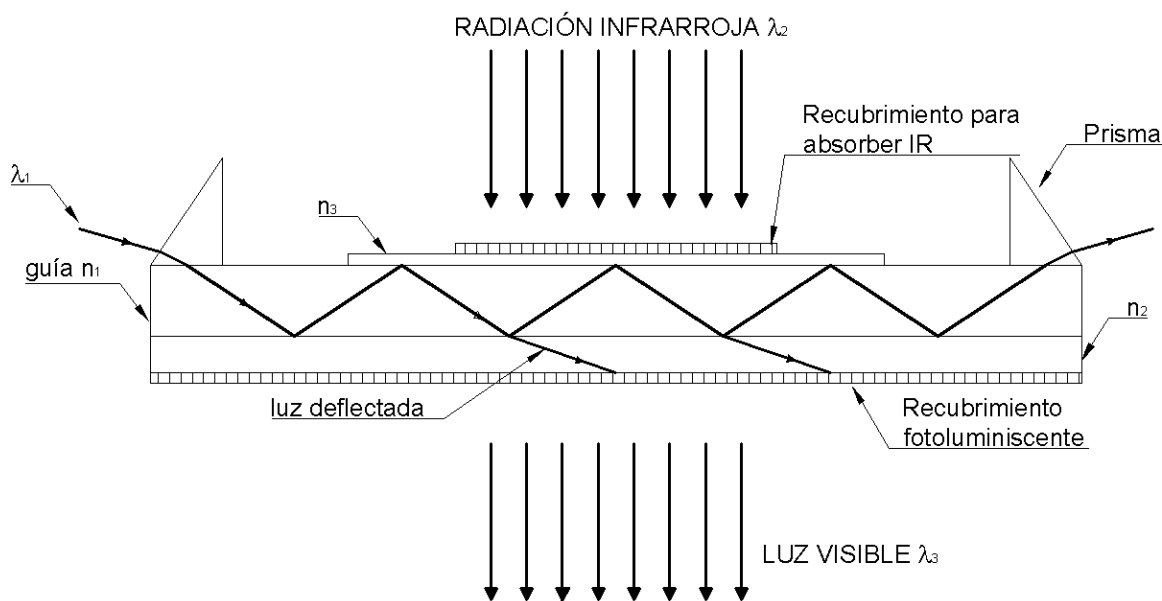


Figura 2.10 Convertidor de IR a visible mediante guías de onda.
(fuente: M. Y. Kleinerman, "Optical systems for sensing temperature and thermal infrared radiation,"
Unites States Patent 5,820,265, (1998)).

El autor no hace mención a dato alguno referente a la resolución espacial o temporal del dispositivo así como a la temperatura de operación. A lo que sí se hace mención es al cambio mínimo de temperatura detectable con su método, el cual es de alrededor de 10^{-3} K, lo cual es una mejora considerable frente a técnicas anteriores (como de medición de temperatura por medición del tiempo de decaimiento de la fluorescencia en función de la temperatura o de medición de la

razón de intensidades de la emisión en fluorescencia en dos bandas como función de la temperatura) en donde el cambio mínimo detectable (según el mismo autor) no es menor a $10^{-2}K$.

En conclusión se puede decir que si bien existen un buen número de técnicas de conversión de IR a visible, mucho del trabajo se realizó hace más de 10 años. No se percibe que en la actualidad el trabajo en convertidores de IR a visible se encuentre en auge, lo que puede deberse al alto rendimiento que proporcionan los arreglos de microbolómetros que no requieren enfriamiento. Sin embargo, las tecnologías actuales, aunque se han abaratado con los años, todavía suponen un fuerte gasto. Es por eso que consideramos que la implementación de una técnica de conversión enteramente óptica, sin componentes sofisticadas ya sean mecánicas, de enfriamiento o de electrónica, como la que se propone en este escrito, puede derivar en la obtención de un dispositivo que de forma más económica resuelva muchas de las necesidades que en termografía y obtención de imágenes térmicas existen.

CAPÍTULO 3

MODELO TÉRMICO

3.1 Convertidor IR a Visible.

El convertidor de IR a visible que se propone en este trabajo se basa en la operación de un cierto tipo de sensor de temperatura por fibra óptica que emplea la técnica de razón de intensidades por fluorescencia²⁻⁵. En dicha técnica es posible conocer la temperatura de la fibra si se mide con exactitud la razón de los valores de intensidad en dos bandas de la luz proveniente de ésta. No obstante, si la temperatura a lo largo de la fibra es variable, entonces también lo es la razón de intensidades. En estos sensores surge el problema relacionado con la falta de uniformidad en la temperatura de la fibra, donde por lo tanto, es difícil saber con exactitud cuál es la temperatura que se está midiendo.

Estos sensores también pueden emplearse para medir temperatura sin contacto físico mediante la determinación de la radiación de cuerpo negro que un cuerpo caliente emite y que la fibra absorbe. Tal absorción (primordialmente en infrarrojo) provoca un cambio en la temperatura de la fibra y por lo tanto en la razón de intensidades de las dos bandas del visible. En otras palabras, tal como lo esquematiza la figura 3.1, es posible convertir la radiación en IR que incide sobre la fibra en radiación visible que posea información sobre la temperatura tanto de la fibra como del cuerpo bajo observación.

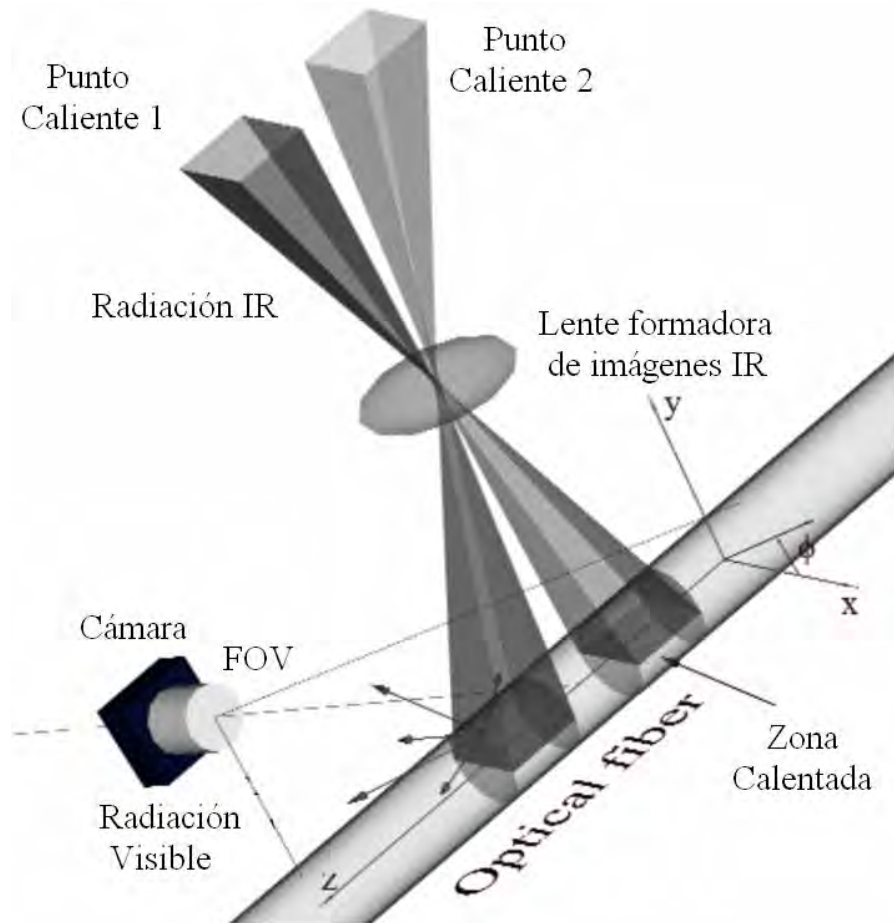


Figura 3.1 La resolución en un sensor de temperatura de fibra óptica puede encontrarse como la distribución de temperatura en un tiempo determinado.

La capacidad de la fibra de poseer diferentes zonas a diferente temperatura es precisamente la cualidad que permite proponer por nuestra parte un novedoso sistema de conversión de IR a visible para la generación de termografías e imágenes térmicas.

3.2 Principio de operación.

Para evaluar la factibilidad del convertidor se ha estudiado una fibra dopada con erbio cuyas propiedades han sido medidas con anterioridad. Aunque es posible

implementar el convertidor con una pieza de material dopado en forma de película, como inicio se ha empleado una fibra por diversas razones. Primero, porque se cuenta con ella gracias a experimentos anteriores y porque ha sido caracterizada a profundidad. Segundo, la fibra es capaz de emitir radiación en dirección longitudinal permitiendo el monitoreo de la emisión espectral. La radiación emitida en forma transversal es la que se emplea en la operación del convertidor.

Se emplea una lente para formar la imagen de dos puntos calientes para la determinación de su resolución espacial y temporal. Dependiendo de las características del material, la distribución de temperatura en la fibra tenderá a estabilizarse con el tiempo. Si la fibra no se encuentra en contacto con un sumidero térmico su temperatura comenzará a aumentar a medida que es irradiada. El proceso de conversión de IR a visible es útil durante una fracción de segundo inmediatamente después de la irradiación de la fibra. Esto la convierte en un convertidor dinámico puesto que responde a una entrada dependiente del tiempo, especialmente si se encuentra en contacto con un sumidero de calor que retire el exceso de calor.

La conversión se realiza de la siguiente manera: se genera la imagen de dos puntos calientes en la fibra. Después de que la imagen térmica se ha generado, el silicio dopado con erbio, (después de ser bombeado adecuadamente) mediante el fenómeno de *up conversion*, convierte la radiación en el infrarrojo cercano en

radiación visible en proporción con el incremento de temperatura local debido a la absorción.

Así, la radiación infrarroja incidente es primero absorbida y luego convertida en calor que provoca un incremento en la temperatura local de la fibra. A su vez, esto causa la emisión de radiación visible gracias al bombeo de la fibra. La radiación visible emitida puede ser detectada fácilmente mediante una cámara de alta resolución para el visible.

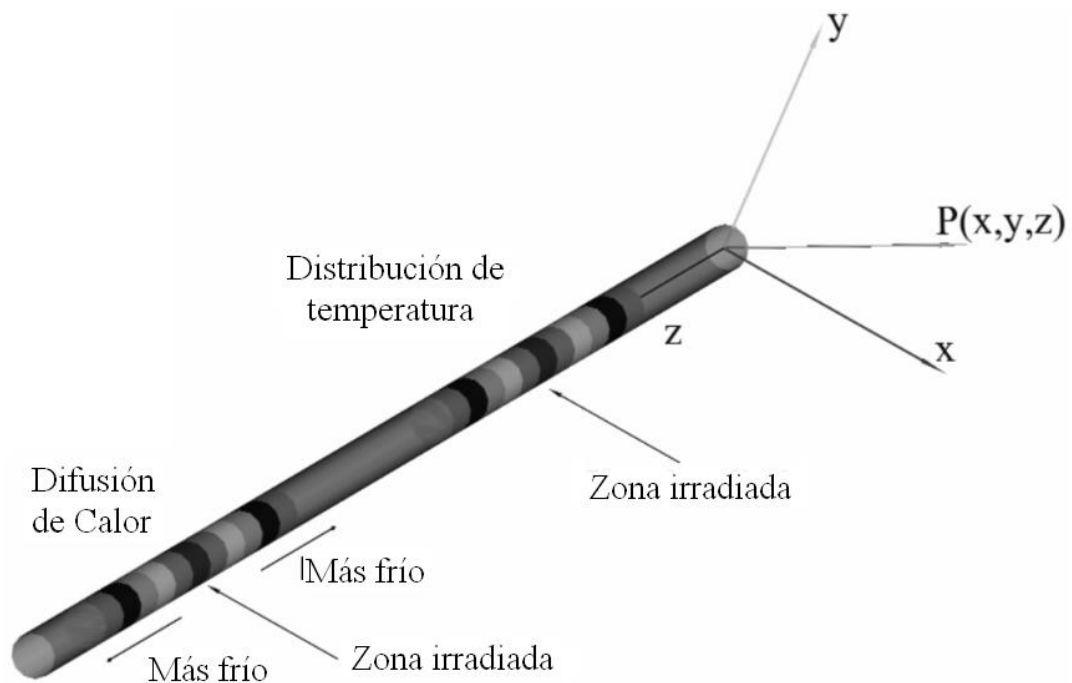


Figura 3.2. Se utiliza un criterio de resolución de dos puntos. Por lo tanto se irradia en dos puntos separados en la fibra.

El primer paso en la evaluación del convertidor es la de determinar su capacidad para mantener una imagen térmica en el espacio y el tiempo. Así, uno de los problemas que surgen en la formación de imágenes térmicas radica en encontrar

la resolución con la que es posible discernir la temperatura entre dos zonas de la fibra cercanas entre sí.

Como la radiación que incide sobre la fibra no es necesariamente uniforme, la variación en la temperatura en una determinada zona dependerá de la irradiancia y de la transferencia de calor por conducción desde y hacia otras zonas. Por tal motivo, es nuestro interés estudiar el comportamiento térmico de la fibra para conocer la resolución espacial y temporal (ver figura 3.2) con la que se dispondrá en la generación de una imagen.

En este trabajo se plantea un modelo térmico basado en la técnica de las diferencias finitas para realizar el análisis tridimensional y en estado transitorio de la transferencia de calor y de esa forma obtener la distribución de temperaturas para una fibra, ya sea enfriada o no enfriada, y sometida a la incidencia de cierta densidad de potencia en forma constante y en forma de pulso.

3.3 Modelo de transferencia de calor.

La obtención del comportamiento en el interior de la fibra como función de la posición y del tiempo sólo puede obtenerse de manera precisa mediante el empleo de simulaciones numéricas. Para ello, es necesaria una ecuación diferencial parcial de segundo orden que contenga la fuente de calor dependiente de la posición y del tiempo para resolver apropiadamente la dependencia temporal de la distribución de temperatura²⁵⁻²⁷.

$$c_e \rho \frac{\partial T(r, \phi, z, t)}{\partial t} = k \nabla^2 T(r, \phi, z, t) - p_s(r, \phi, z, t) \quad (3.1)$$

donde $T(r, \phi, z, t)$ = distribución de temperatura en el objetivo [K];

t = tiempo [s];

(r, ϕ, z, t) = coordenadas cilíndricas;

ρ = densidad [kg/m^3];

c_e = capacidad calorífica específica [$\text{J}/(\text{kg K})$];

k = conductividad térmica [$\text{W}/(\text{m K})$];

$p_s(r, \phi, z, t)$ = densidad de potencia absorbida por unidad de área con dependencia temporal y espacial [W/m^2].

Para resolver la ecuación anterior es necesario el empleo de simulaciones numéricas. Para tal efecto se optó por modelar la transferencia de calor mediante la técnica de las diferencias finitas y de utilizar coordenadas cilíndricas para facilitar el cómputo²⁸.

En el modelo se considera que la fibra se encuentra en vacío y que no transfiere calor con el medio ambiente por medio de convección. Tampoco se consideran pérdidas de calor a causa de emisión de la fibra hacia el exterior. Así, el incremento de temperatura se debe solamente a la radiación que incide sobre ella. Para el enfriamiento de la fibra se considera que ésta se encuentra en perfecto

contacto por la parte posterior con un sumidero ideal a una temperatura fija, por lo que la transferencia entre ambos es por medio de conducción.

3.3.1 Diferencias finitas.

La fibra se modela tridimensionalmente en forma de nodos que representan diferenciales de volumen cilíndricos y que se conectan entre sí mediante barras que poseen las características térmicas del material específico. La fibra se divide en una serie de secciones transversales con un espesor finito (Δz). Cada una de ellas se subdivide a su vez en anillos (Δr) y en gajos ($\Delta \phi$) para formar el número total de nodos que conforman los elementos de la fibra. En el modelo se emplean un número total de 1800 nodos correspondientes a una zona de la fibra de 1.25 mm de largo por 125 μm de diámetro. La figura 3.3 muestra el diferencial de volumen cilíndrico y la figura 3.4 representa la disposición de los elementos que conforman la fibra.

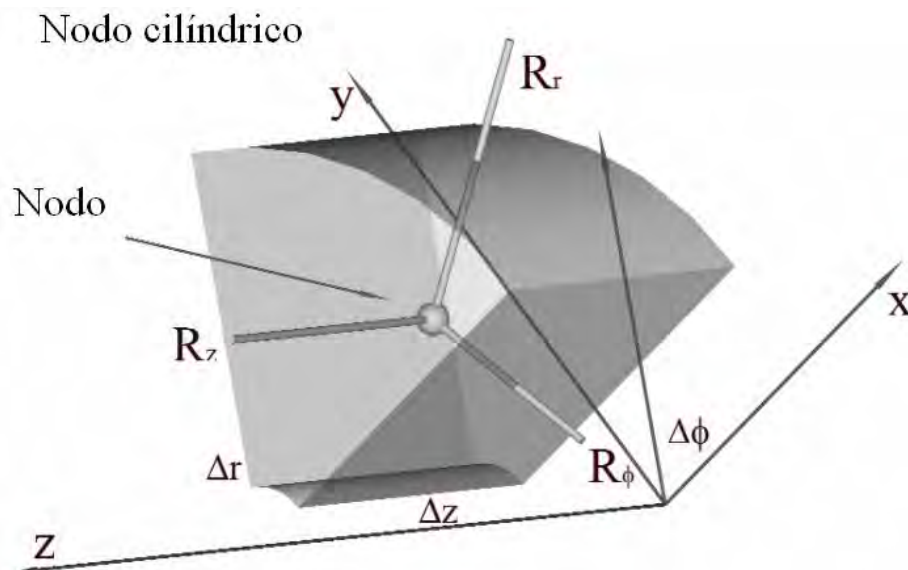


Figura 3.3 La técnica de las diferencias finitas divide un sólido tridimensional en elementos de volumen denotados como nodos.

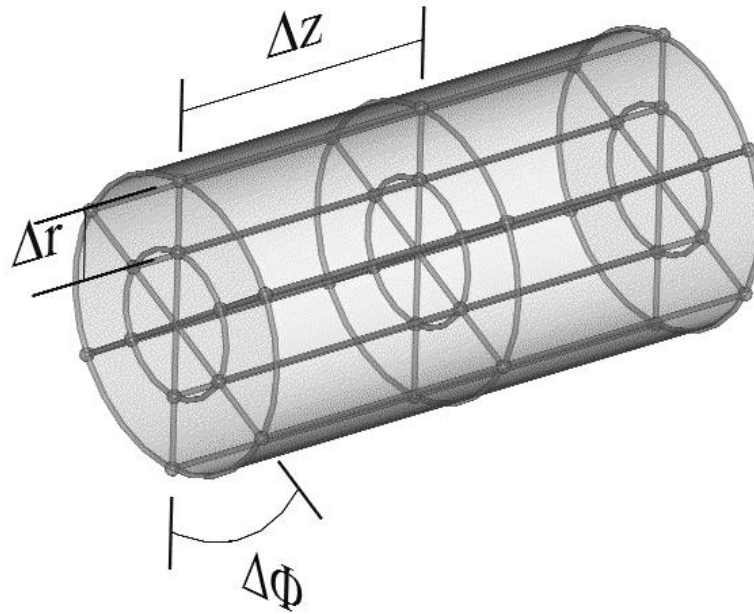


Figura 3.4 La fibra se divide en elementos de volumen adecuadamente distribuidos.

3.3.2 Propiedades térmicas.

Para observar las tendencias en el comportamiento térmico de la fibra es necesario introducir en el modelo sus propiedades mecánicas y térmicas. Tales propiedades son la densidad, la capacidad calorífica específica, conductividad térmica, absorptividad y la densidad de potencia absorbida por unidad de área.

En el modelo físico se asume que el calor que incrementa la temperatura de la fibra se genera en los nodos superficiales, es decir, se considera que todo el calor incidente se absorbe en la superficie de la fibra. Se emplea un valor normalizado (los resultados pueden escalarse posteriormente al tratarse de un comportamiento lineal) para la densidad de potencia incidente sobre la superficie de $1 \mu\text{W}/\text{mm}^2$. La absorptividad del material se ha fijado en 1; el material de la fibra es óxido de silicio dopado con Er^{+3} con una densidad de $2202 \text{ Kg}/\text{m}^3$, capacidad calorífica

específica de $741 \text{ J}/(\text{kg K})$, conductividad térmica de $1.38 \text{ W}/(\text{m K})$, un diámetro de $125 \text{ }\mu\text{m}$, y una temperatura inicial de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ tanto en la fibra como en la placa de enfriamiento.

3.4 Simulación.

Como lo muestra la figura 3.5, el calentamiento se simula mediante la incidencia de densidad de potencia que se absorbe sólo en dos zonas específicas de la superficie de la fibra. Se realizaron varios tipos de simulaciones: comportamiento como respuesta a un escalón y a un pulso de irradiancia (ver figura 3.6 (a) y 3.6 (b)). A su vez en cada caso se consideró la fibra con y sin enfriamiento externo.

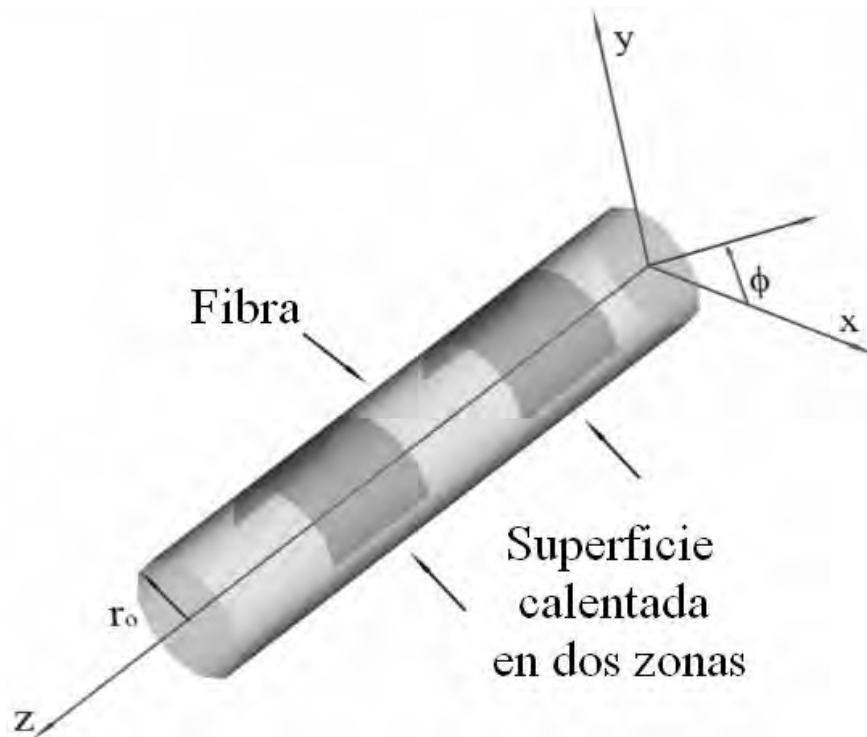
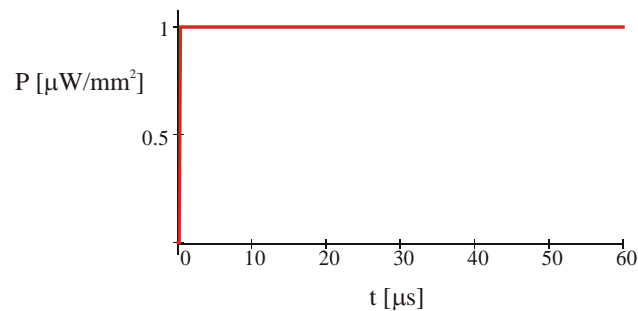
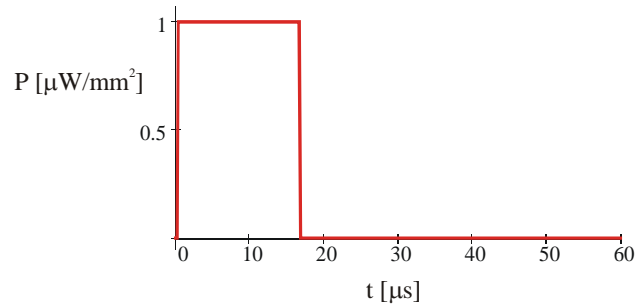


Figura 3.5 La potencia incidente se absorbe en dos zonas de la fibra.

El área proyectada de cada zona de la fibra irradiada corresponde a aquella formada por un cuadrado de 125 μm de lado. La separación entre los centros de cada zona es de 400 μm . Para la simulación de un único pulso, la duración de éste fue de 1/60 de segundo. Tanto en el caso del escalón como en el del pulso, el comportamiento de la temperatura se siguió durante 1/30 de segundo.



(a)



(b)

Figura 3.6 Incidencia de potencia en la fibra (a) constante y (b) en forma pulsada.

En el caso de la simulación sin enfriamiento, la fibra se encuentra en vacío por lo que ésta no pierde calor por ningún medio. Esta condición a la frontera se justifica considerando que los incrementos de temperatura en la fibra son lo suficientemente bajos. Para el enfriamiento, la superficie posterior de la fibra se

pone en contacto con una placa enfriada que constituye un sumidero ideal. De esta forma, se asume que los nodos de la superficie posterior se encuentran siempre a la misma temperatura que la placa, esto es 20 °C.

Si bien el programa es capaz de generar la temperatura de cada nodo de la fibra para cualquier instante, nuestro interés es conocer primordialmente la distribución de temperaturas a lo largo del eje de la fibra (eje Z). Para tal fin, y por razones de claridad, se generan únicamente gráficas que despliegan el promedio de temperatura de una sección transversal de la fibra en función de la posición o del tiempo. Dicho valor se calcula mediante el promedio pesado de los valores de temperatura de todos los nodos que componen la región del núcleo en cada sección transversal.

3.5 Resultados.

Se presenta la distribución de temperaturas para dos perfiles de irradiación distintos. En el modelo se aproximan las zonas irradiadas de la fibra como dos fuentes superficiales de calor. La potencia absorbida incluye el factor de oblicuidad y el de absorción. Se presentan dos esquemas de enfriamiento: primero sin enfriamiento y después con enfriamiento mediante un sumidero de calor.

3.5.1 Irradiación constante sin sumidero de calor.

Como lo muestra la figura 3.7, en la primera simulación estudiamos el comportamiento térmico de la fibra cuando ésta se somete a radiación constante mientras la fibra no es enfriada. La respuesta calculada se muestra en la figura 3.8. La figura 3.8(a) muestra el incremento de temperatura a lo largo del eje Z como función del tiempo para el caso de iluminación uniforme. La dependencia temporal se da en incrementos de tiempo $\Delta t = 6$ msec. Puede observarse como ambos picos permanecen resueltos durante todo el tiempo de la simulación.

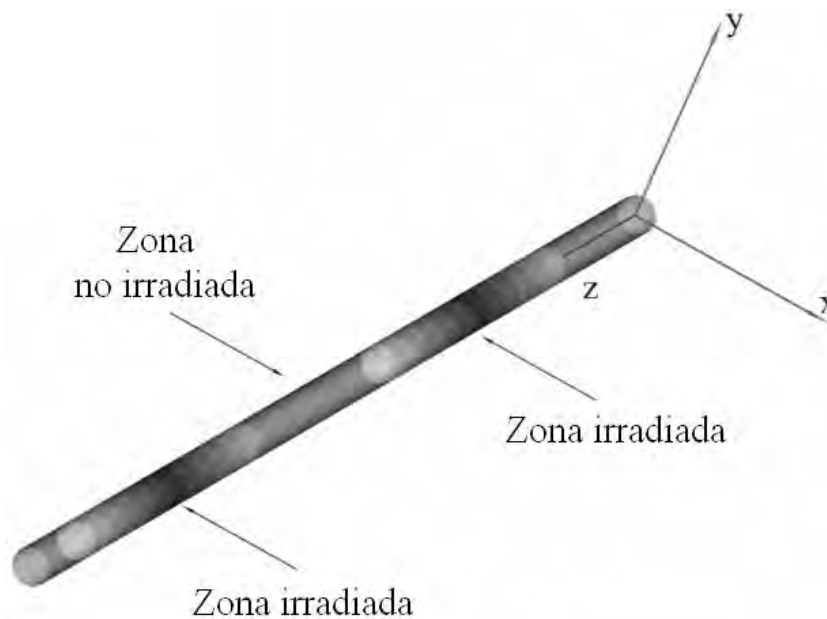


Figura 3.7 El área proyectada de cada zona de la fibra irradiada es de $125 \mu\text{m}^2$ con una separación entre sus centros de $375 \mu\text{m}$.

Para cada incremento de tiempo, la temperatura de los puntos calientes en la fibra y el punto relativamente frío entre ellos se incrementa lenta pero de forma estable. En este caso como la fibra no tiene forma de perder calor, la temperatura no logra estabilizarse.

Lo anterior queda de manifiesto más claramente en la figura 3.8(b) donde el incremento de temperatura entre los puntos del pico y el valle se muestran como función del tiempo. También es posible notar como la diferencia de temperatura entre la zona irradiada y la no irradiada se mantiene constante a partir de 10 msec.

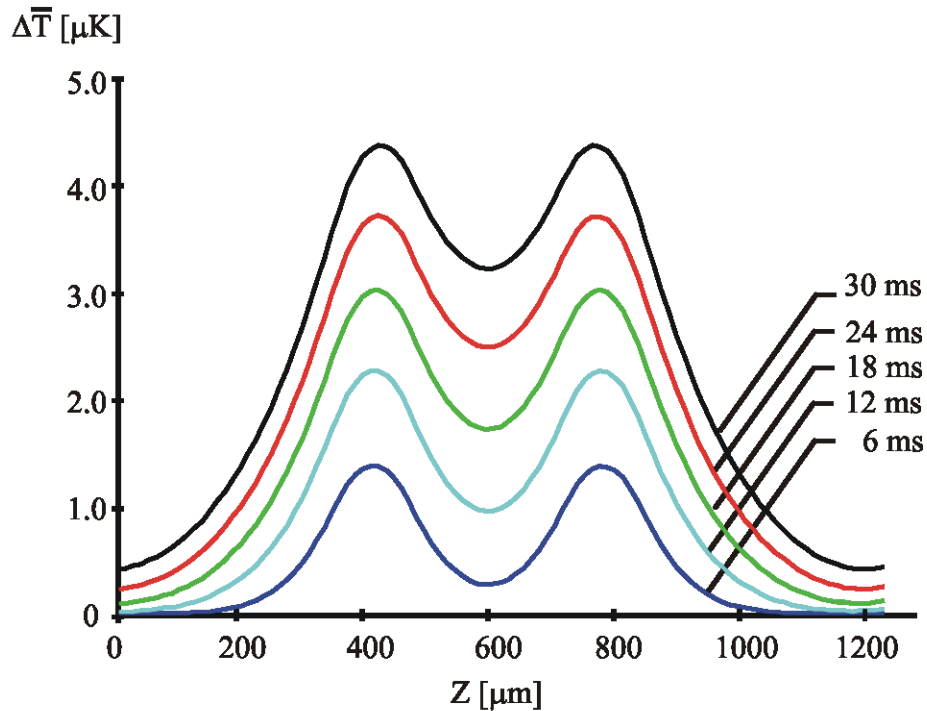


Figura 3.8(a) Incremento en la temperatura promedio de la sección transversal del núcleo de la fibra, como función de la longitud de la fibra y el tiempo como parámetro (para irradiancia constante y la fibra sin contacto con el sumidero térmico).

3.5.2 Irradiación constante con sumidero de calor.

Posteriormente la fibra se enfría, como se ilustra en la figura 3.9, y una vez más se obtiene la distribución de temperaturas para irradiancia constante. El enfriamiento se hace con el objeto de incrementar la respuesta térmica de los dos puntos calentados. La respuesta se muestra paraméricamente en las figura 3.10(a) para

tres diferentes tiempos de observación. Se puede observar como los picos se mantienen claramente definidos en un tiempo $t = 15$ msec.

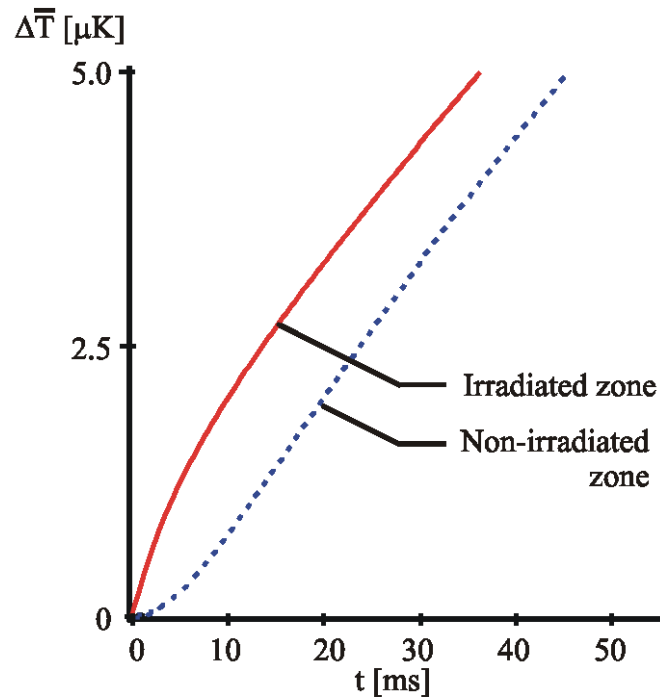


Figura 3.8(b) Incremento en la temperatura promedio de la sección transversal del núcleo de la fibra como función del tiempo, en el pixel calentado y el no calentado (para irradiancia constante y la fibra sin contacto con el sumidero térmico).

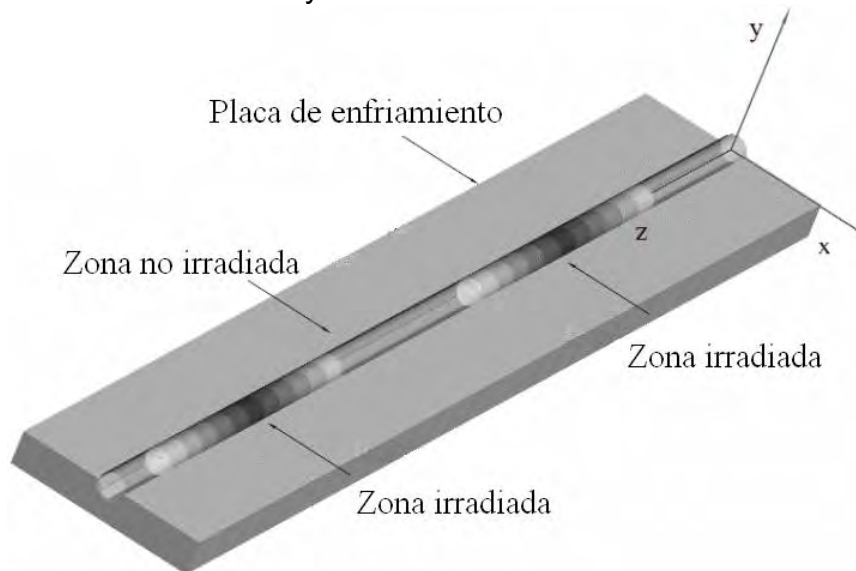


Figura 3.9 Enfriamiento de la fibra irradiada.

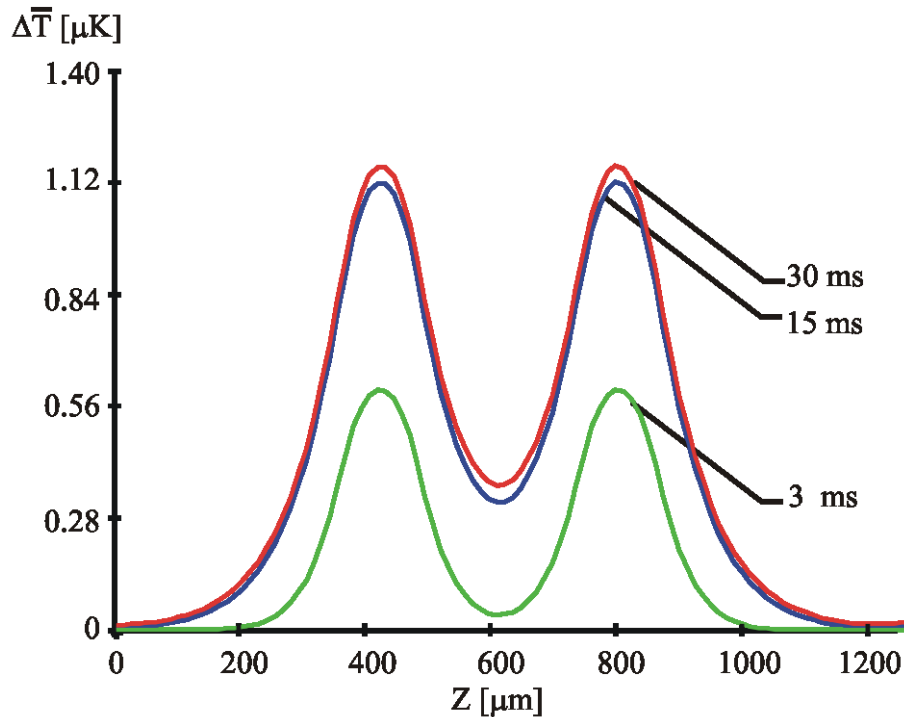


Figura 3.10(a) Incremento en la temperatura promedio de la sección transversal del núcleo de la fibra, como función de la longitud de la fibra y el tiempo como parámetro (para irradiancia constante y la fibra en contacto con el sumidero térmico).

Cuando el tiempo de calentamiento se dobla a 30 msec, el patrón se mueve ligeramente hacia arriba pero la diferencia de temperaturas entre el punto caliente y su vecino más frío permanece bien definida y casi sin cambio. Lo anterior se aprecia más claramente en la figura 3.10(b) donde la diferencia de temperatura entre el píxel calentado y el no calentado se muestra como función del tiempo de irradiación. De hecho, la diferencia de temperaturas se incrementa, y la resolución en temperatura se incrementa en el intervalo de observación entre 15 y 30 msec. Al comparar las figuras 3.9 y 3.10 se puede concluir que la inclusión del sumidero de calor contribuye de forma importante en el desempeño del convertidor ya que su presencia mejora la resolución espacial y temporal del dispositivo propuesto.

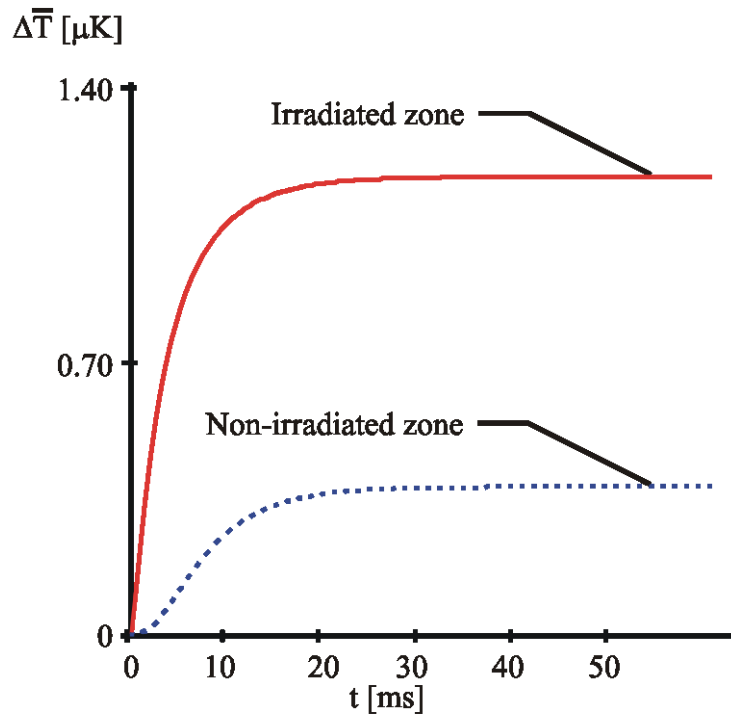


Figura 3.10(b) Incremento en la temperatura promedio de la sección transversal del núcleo de la fibra como función del tiempo, en el pixel calentado y el no calentado (para irradiancia constante y la fibra en contacto con el sumidero térmico).

3.5.3 Irradiación pulsada sin sumidero de calor.

La respuesta de la fibra a irradiación pulsada se ilustra en la figura 3.11(a) y 3.11(b). Aquí, la fibra se calienta en la misma manera que en el caso de potencia constante anterior. Sin embargo, después de $1/60$ de segundo, se detiene la irradiación y la temperatura de todos los nodos se homogeneiza por la conducción interna de calor. La diferencia de temperaturas entre la zona irradiada y la no irradiada se comporta de la misma manera que anteriormente pero disminuye rápidamente después del fin del pulso. Es necesario notar que como la fibra no tiene forma de perder calor la temperatura final de todos sus nodos se

incrementará después del pulso, lo que origina el colapso de los dos puntos en uno sólo, destruyendo así la resolución espacial del dispositivo propuesto.

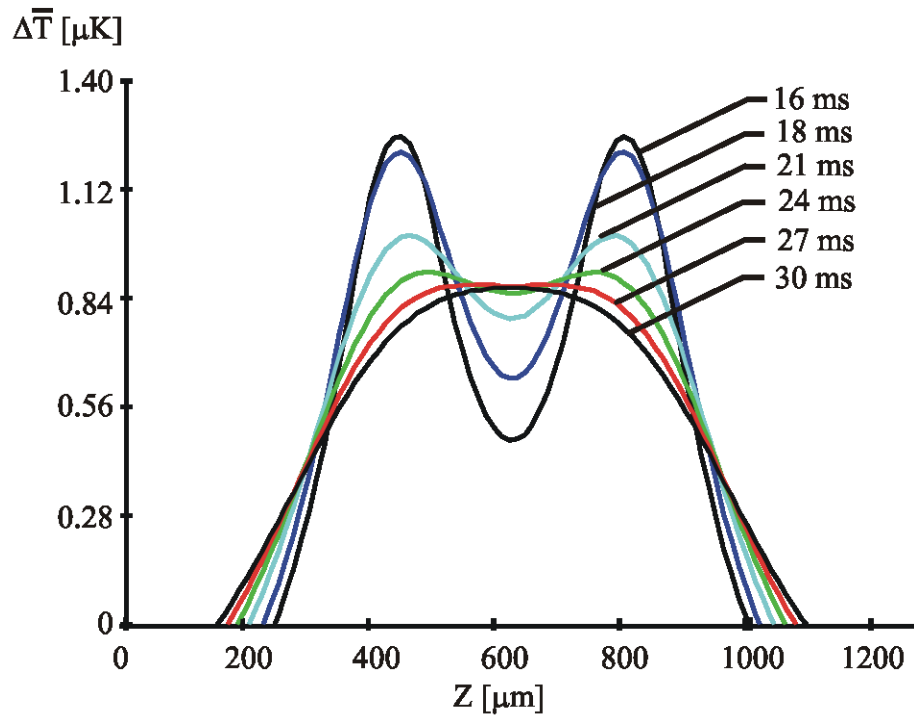


Figura 3.11(a) Incremento en la temperatura promedio de la sección transversal del núcleo de la fibra, como función de la longitud de la fibra y el tiempo como parámetro (para irradiancia pulsada y la fibra sin contacto con el sumidero térmico).

3.5.4 Irradiación pulsada con sumidero de calor.

Las figuras 3.12(a) y 3.12(b) muestran a la fibra cuando se enfría y se somete al un pulso de irradiación. Esta vez la fibra se encuentra en contacto con el sumidero de calor para mejorar la respuesta. El sistema se comporta de la misma manera que como en el apartado 3.5.2 hasta que la radiación cesa después de 16 ms. Gracias a la incorporación del sumidero, el rápido descenso y homogeneización de la temperatura de la fibra es de gran ayuda pues permite la repetitividad del evento. Por evento nos referimos a un ciclo de calentamiento y enfriamiento de las zonas de la fibra.

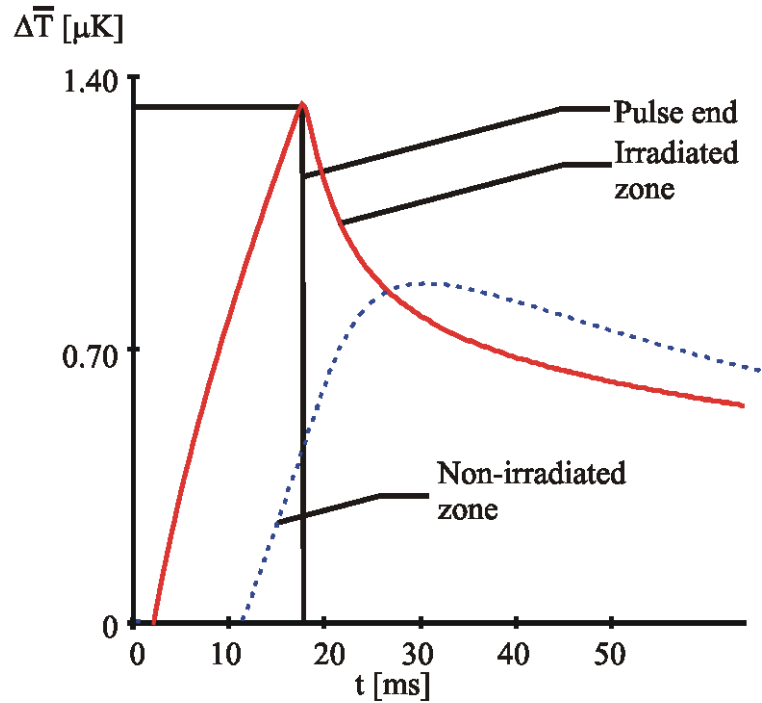


Figura 3.11(b) Incremento en la temperatura promedio de la sección transversal del núcleo de la fibra como función del tiempo, en el pixel calentado y el no calentado (para irradiancia pulsada y la fibra sin contacto con el sumidero térmico).

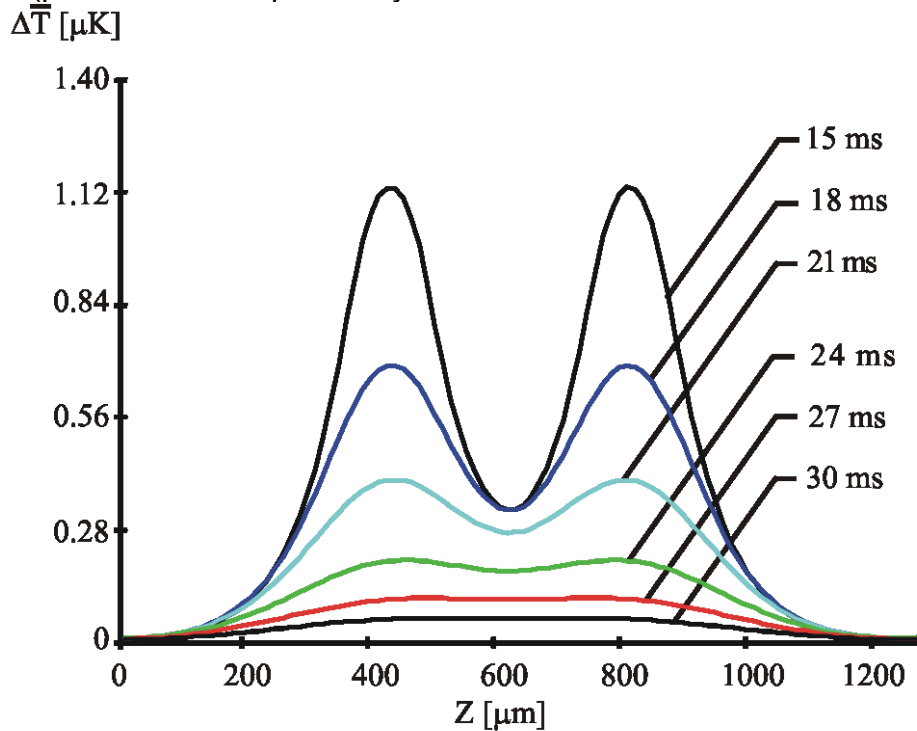


Figura 3.12(a) Incremento en la temperatura promedio de la sección transversal del núcleo de la fibra, como función de la longitud de la fibra y el tiempo como parámetro (para irradiancia pulsada y la fibra en contacto con el sumidero térmico).

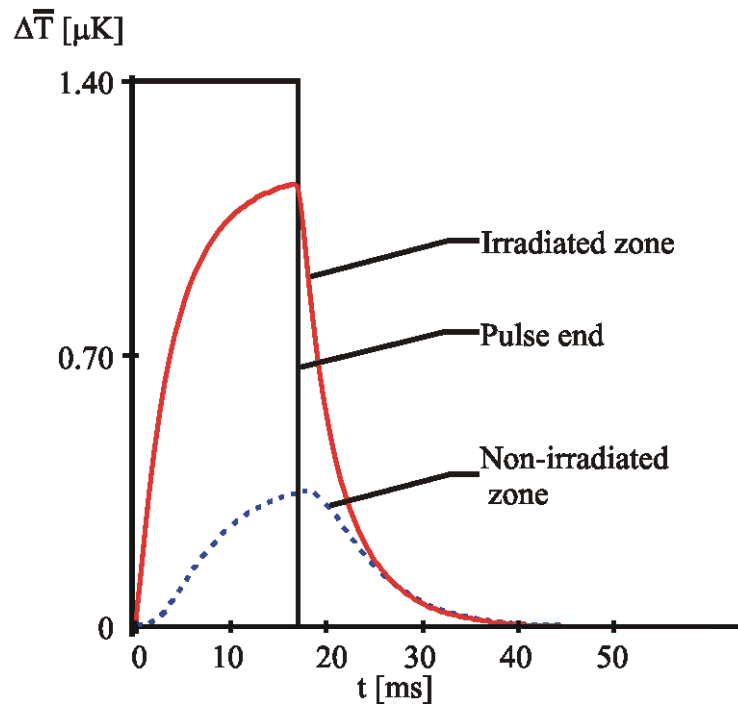


Figura 3.12(b) Incremento en la temperatura promedio de la sección transversal del núcleo de la fibra como función del tiempo, en el pixel calentado y el no calentado (para irradiancia pulsada y la fibra en contacto con el sumidero térmico).

3.5.5 Resolución espacial.

Por medio de simulaciones subsecuentes se encontró la relación mostrada en la figura 3.13 que señala la distancia mínima a la que deberán encontrarse los pixeles calentados entre sí para que éstos puedan resolverse. La gráfica resultó lineal para todo el rango de diámetros debido a la consideración tomada en el criterio de resolución. Se buscó que, como lo muestran las figuras 3.10(a) y 3.12(a), el punto donde se intersectan las dos curvas que representan cada uno de los puntos calentados, no estuviera por encima del 80 % de la altura de cada pico. Así, encontramos que para igualar la forma de las gráficas para cada diámetro y obtener un perfil donde cada pico pudiera ser resuelto, era necesario asegurar que

la zona o “spot” que se calentaba en cada caso fuera en forma de un cuadrado de lados siempre iguales al diámetro de la fibra.

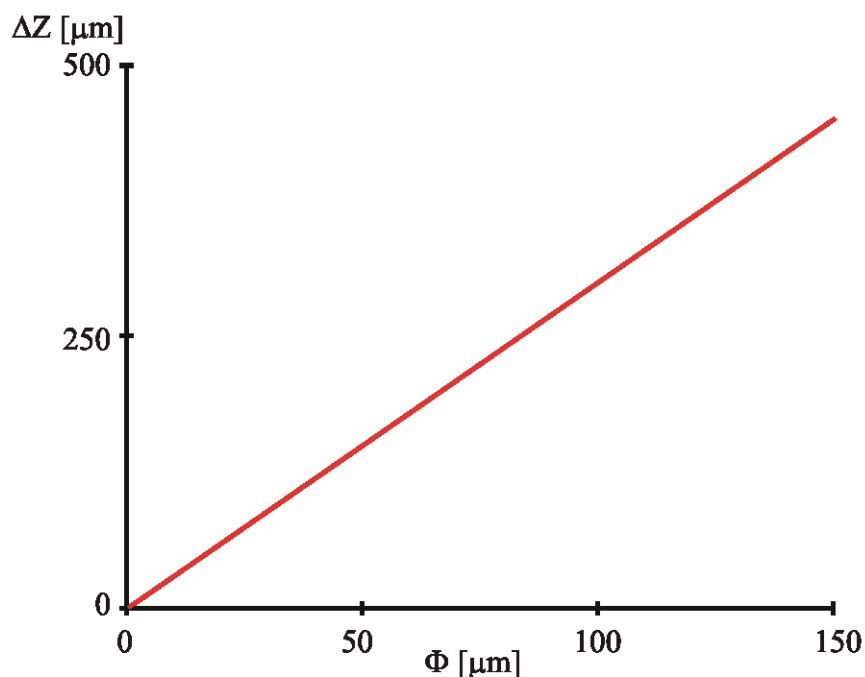


Figura 3.13 Distancia mínima (ΔZ) entre picos de temperatura que debe existir para que éstos puedan resolverse en función del diámetro (Φ) de la fibra.

Después de analizar los cuatro casos, ya es posible concluir que la incorporación del sumidero de calor mejora notablemente el desempeño del dispositivo.

Si bien la temperatura máxima de la zona irradiada es mayor para el caso no enfriado, el enfriamiento de la fibra garantiza la repetitividad de un evento. Aquí, la diferencia máxima de temperaturas entre dos zonas adyacentes se mantiene constante después de 1/60 de segundo. En el enfriamiento la fibra decae al 2 por ciento del valor máximo después de 1/60 de segundo. Tal comportamiento puede ser útil para adquirir información a razón de 30 cuadros por segundo.

Debe mencionarse por último que aunque el modelo se verificó mediante pruebas internas tales como conservación de energía será necesaria la utilización de una cámara de alta resolución en el visible para determinar la utilidad de la técnica en pruebas experimentales.

En el siguiente capítulo se expondrán resultados experimentales que con los que se verifica la factibilidad del empleo del convertidor de IR a Visible propuesto.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN ISOTÉRMICA

Con la finalidad de determinar la factibilidad de implementar el dispositivo convertidor de IR a visible que se propone en este trabajo, y de obtener resultados reales en términos de resolución en la medición de temperatura, realizamos una serie de experimentos con una fibra óptica dopada con erbio. El trabajo experimental se enfocó en la caracterización de la fluorescencia radial exhibida en la fibra en función de su temperatura con el objeto de encontrar los valores de sensibilidad, resolución, relación señal ruido y linealidad. Por último se propuso un método de calibración para dispositivo..

4.1 Arreglo experimental.

La implementación del convertidor de IR a visible ilustrado en la figura 4.1 requiere del conocimiento del valor de la razón de intensidades a lo largo de una fibra óptica. El convertidor se basa en el fenómeno de fluorescencia generado gracias a que el Er^{+3} , material dopante de la fibra, genera radiación visible en proporción a su temperatura local, la cual se modifica con la radiación IR absorbida. El elemento del convertidor que se encarga de transformar la información en IR a visible se muestra en la figura 4.2. Dicho elemento consiste en un arreglo ordenado de fibras que, en su conjunto, forman una superficie sobre la cual puede formarse una imagen térmica. Con la ayuda de una rejilla metálica perforada es

posible determinar el número y tamaño de cada píxel. La rejilla debe bloquear la radiación infrarroja incidente en ciertas regiones y transmitirla en otras. Así, se garantiza que sólo ciertas zonas de las fibras sean irradiadas conformándose de esa forma cada elemento sensor (píxel). Las fibras son colocadas en contacto con un sumidero térmico para controlar la temperatura del arreglo y garantizar la repetitividad de operación al remover el calor excedente de la fibra después de cada ciclo de adquisición de una imagen.

Para conocer la temperatura local de la fibra se debe conocer entonces el valor de la intensidad de fluorescencia emitido por la fibra en, por lo menos, dos bandas situadas en la región del verde del espectro. La razón local entre las intensidades de ambas bandas se relaciona directamente con la temperatura local de la fibra¹. Por tal motivo, es necesario conocer el comportamiento espacial de la fluorescencia de la fibra en función del tiempo y de la temperatura. La figura 4.3 muestra la fibra empleada en el trabajo experimental realizado para tal fin. La fibra es de óxido de silicio dopado con Er^{+3} con una concentración de 2300 ppm, con un diámetro de cladding de 125 μm y un núcleo de 2.7 μm , el cual se bombea con 50mW de radiación infrarroja a 980nm.

Una primera aproximación para determinar el comportamiento en términos de fluorescencia de la fibra en función del tiempo fue la de tratar de determinar la estabilidad y la repetitividad de la fluorescencia en la fibra. Con tal motivo, se empleó un radiómetro de la marca Newport modelo 815. Con el arreglo se formó

la imagen de la fibra en la superficie del radiómetro para de esa forma poder registrar la cantidad de radiación emitida por la fibra en la banda centrada en 530 nm. Desafortunadamente la potencia emitida por la fibra es tan pequeña que no fue posible registrar ninguna señal. Entonces, se modificó el arreglo y se sustituyó el radiómetro por otro mucho más sensible el S20MM de la marca Thorlabs. Sin embargo, tampoco fue posible registrar señal alguna.

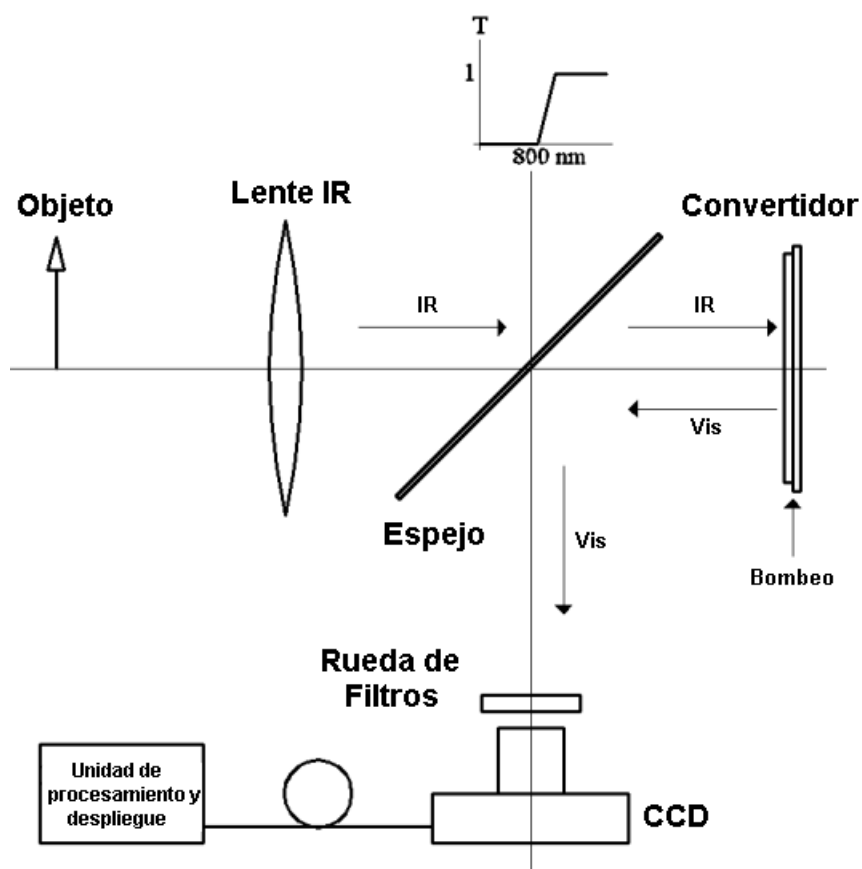


Figura 4.1 Disposición de los componentes del convertidor IR a visible.

Dada la debilidad de la señal proveniente de la fibra, y con la finalidad de controlar el tiempo de integración en el detector, se decidió emplear la cámara digital de alta resolución (1024 x 1536 píxeles) termo-enfriada de la marca Apogee. Una ventaja

del empleo de una cámara es que de esa forma se caracteriza el comportamiento de la fibra de la misma forma en la que se planea que funcione el convertidor de IR a visible. Esto es, la cámara debe registrar en el visible la razón de intensidades en dos bandas de fluorescencia.

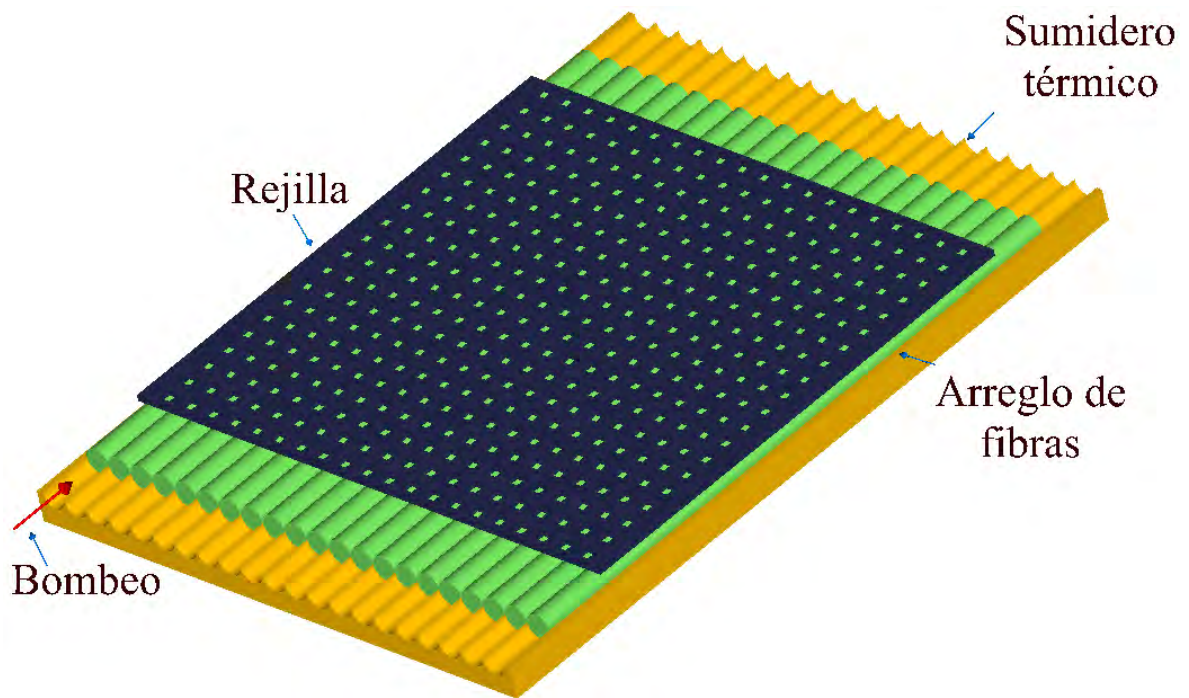
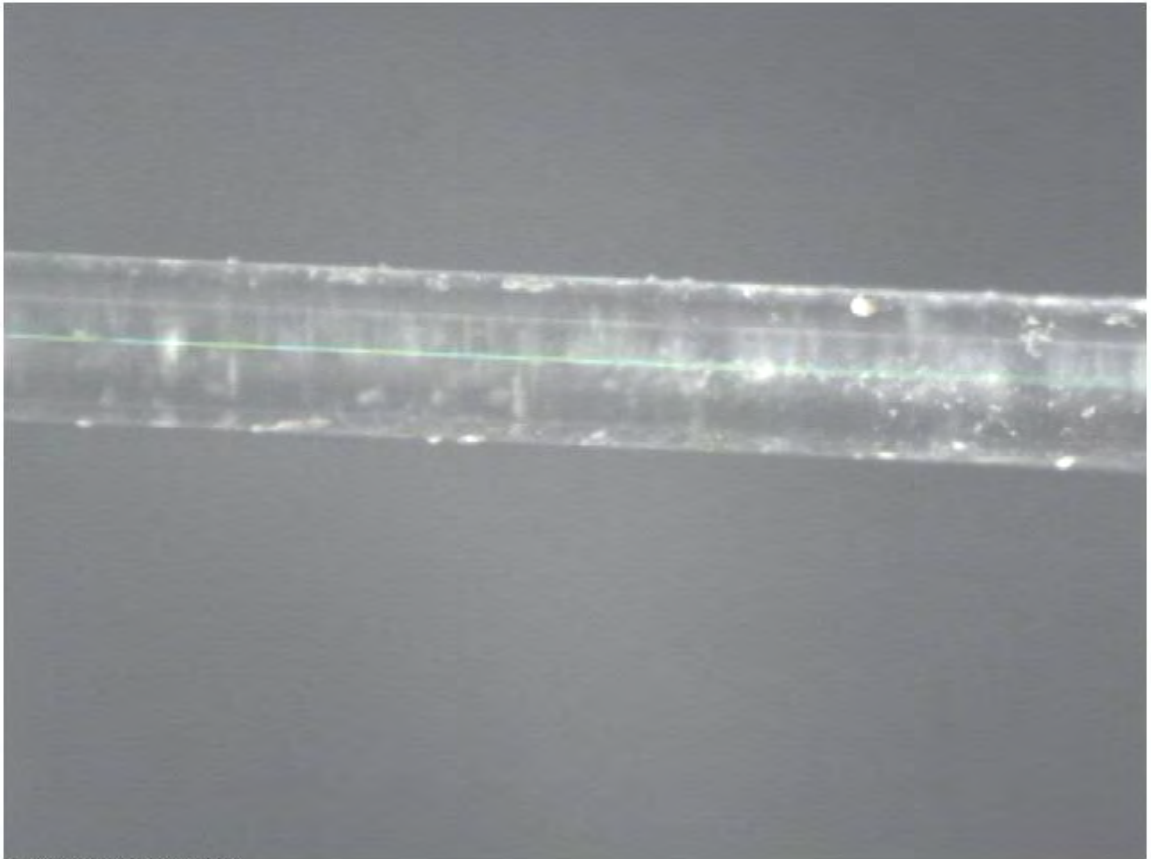


Figura 4.2 Configuración del elemento sensor en el convertidor de IR a visible propuesto.

El arreglo con la cámara se ilustra en la figura 4.4. La cámara obtiene dos imágenes de la fibra, cada una filtrada en una banda diferente del espectro, con la ayuda de una montura revólver de filtros. Los filtros empleados son de tipo interferométrico y se encuentran centrados en 532 nm y 550 nm. Posteriormente las imágenes adquiridas son procesadas digitalmente y comparadas entre sí con el objeto de encontrar la razón de intensidades de fluorescencia (I_{532}/I_{550}) a lo largo de la fibra. La principal ventaja de este montaje consiste en que es posible

caracterizar el comportamiento de la fibra en términos de fluorescencia, en función del tiempo y la temperatura en forma directa.

Gracias a la alta resolución de la cámara (1024 x 1536 píxeles) y al sistema óptico empleado, la resolución de cada imagen es alta, pues permite que cada píxel registre la información correspondiente a una zona de la fibra de $3.3 \mu\text{m}$ por lado.



MR-1.7, MG-1.7, MB-1.7

Figura 4.3 Fluorescencia en el núcleo de una fibra dopada con erbio con 50 mW de bombeo infrarrojo a 980 nm.

La primera serie de mediciones de la razón de intensidades en la fibra, al ser medida en forma transversal, arrojó datos inesperados. Al encontrarse la totalidad de la fibra dopada (12 cm.) en equilibrio térmico se esperaba que el valor de la razón fuera constante a lo largo de la fibra. Sin embargo, en todos los casos

aparecía una pendiente negativa en dirección del extremo libre de la fibra. Por otra parte, las fluctuaciones en los valores registrados entre píxeles adyacentes eran por demás notables, tanto que era imposible discernir con claridad la tendencia de la curva. Tomando como parámetro la dependencia entre razón de intensidades y temperatura de la fibra medidas con anterioridad ¹ se obtenía una fluctuación de temperaturas en la fibra de hasta 300 °C en tan sólo 12 cm. de fibra. Estos primeros resultados ponían de manifiesto una posible incapacidad de la técnica por obtener resultados adecuados.

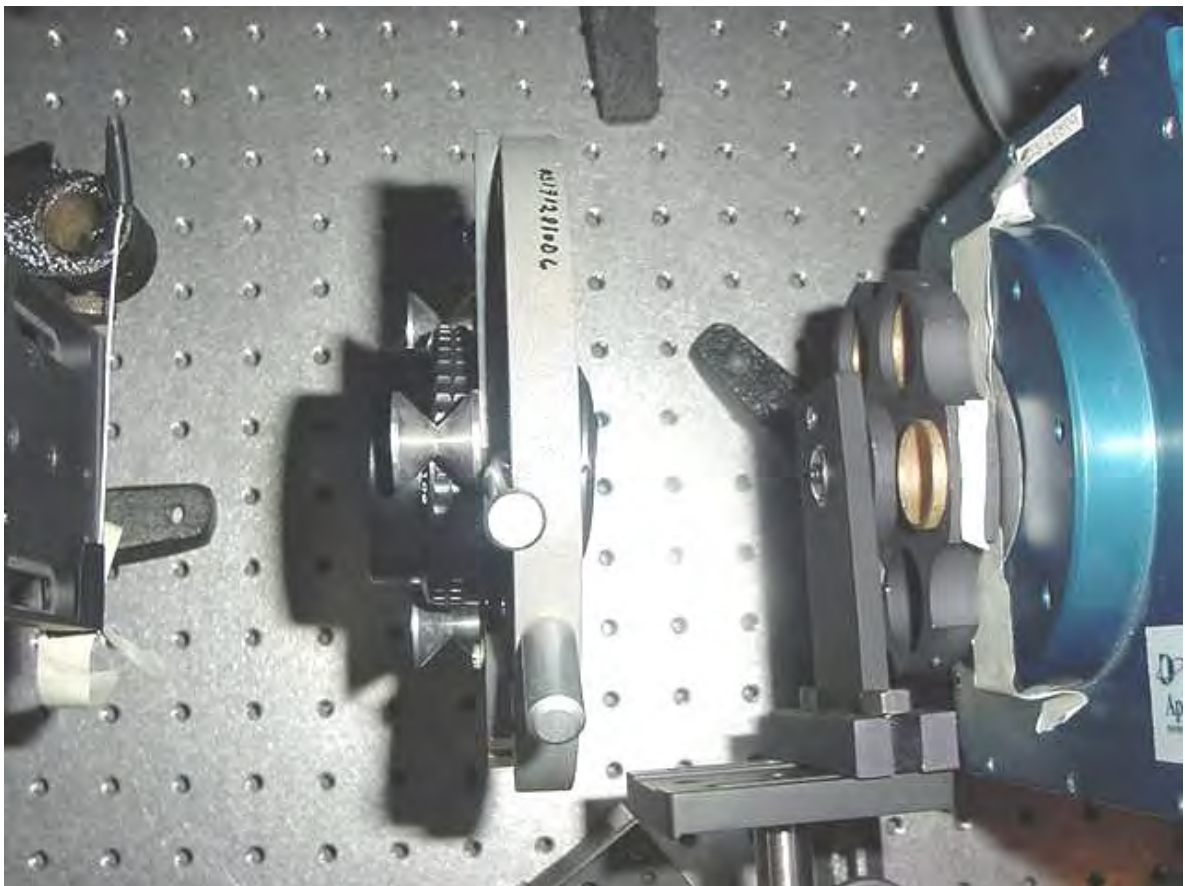


Figura 4.4 Disposición inicial del arreglo experimental.

Además, el análisis de repetitividad mostraba una completa aleatoriedad en los valores de la razón de intensidades registrados por cada píxel en una serie de exposiciones realizadas cada hora a lo largo de 11 horas.

Como una medida dirigida a eliminar la aleatoriedad en los valores registrados por cada píxel, se decidió incluir la lente cilíndrica mostrada en las figuras 4.5 y 4.6 dentro del sistema óptico. Dicha lente se introdujo con la finalidad de expandir en la dirección transversal el tamaño de la imagen de la fibra. Esto permite la posibilidad de determinar el valor de la razón de intensidades en cada elemento de la fibra (píxel de la fibra) mediante el promediado de un determinado número de píxeles de la imagen correspondiente.

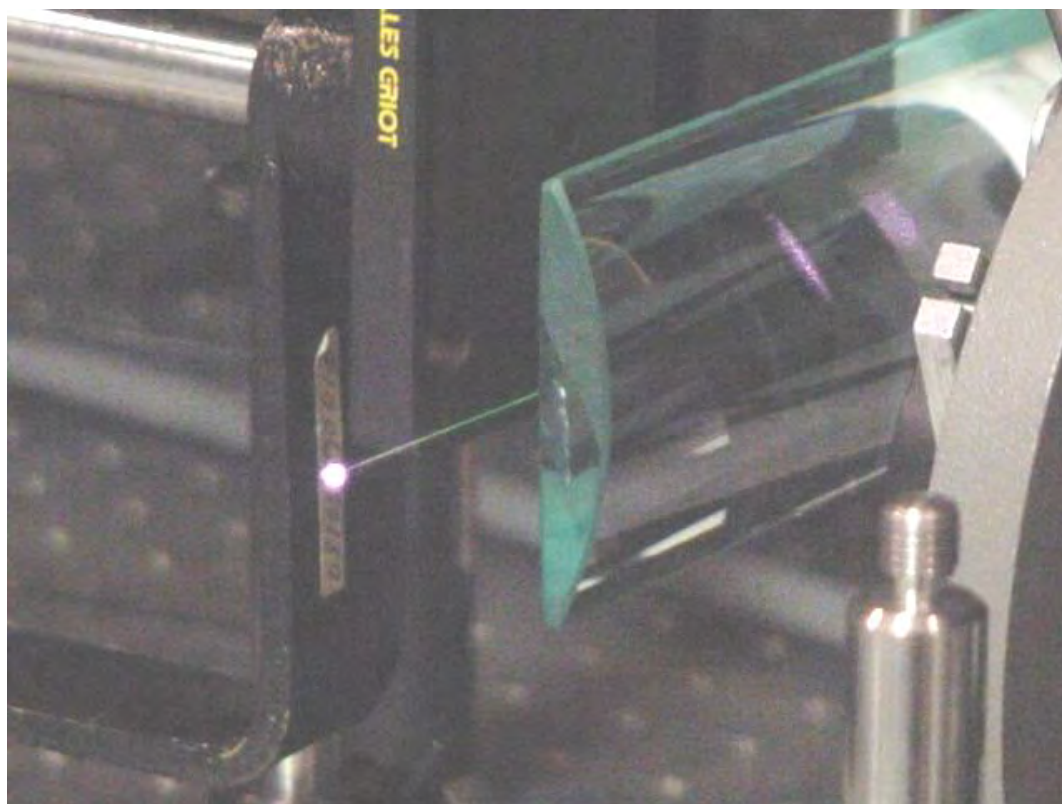


Figura 4.5 Lente cilíndrica empleada en la expansión de la imagen de la fibra.

La implementación de la lente cilíndrica modificó, tal como se esperaba, los resultados obtenidos. Por un lado disminuyó la pendiente “indeseada” de la curva, con lo que la fluctuación aparente en la temperatura de la fibra disminuyó “a tan sólo” 30 °C, mientras que mejoró substancialmente la repetitividad temporal de la medición. Sin embargo, debido al debilitamiento de la señal producida por la expansión de la imagen, los tiempos de integración (exposición) necesarios para obtener un relación señal ruido cercana a 3 resultaron elevados, fluctuando entre los 200 y los 300 segundos. El montaje final se ilustra en las figuras 4.7 y 4.8.

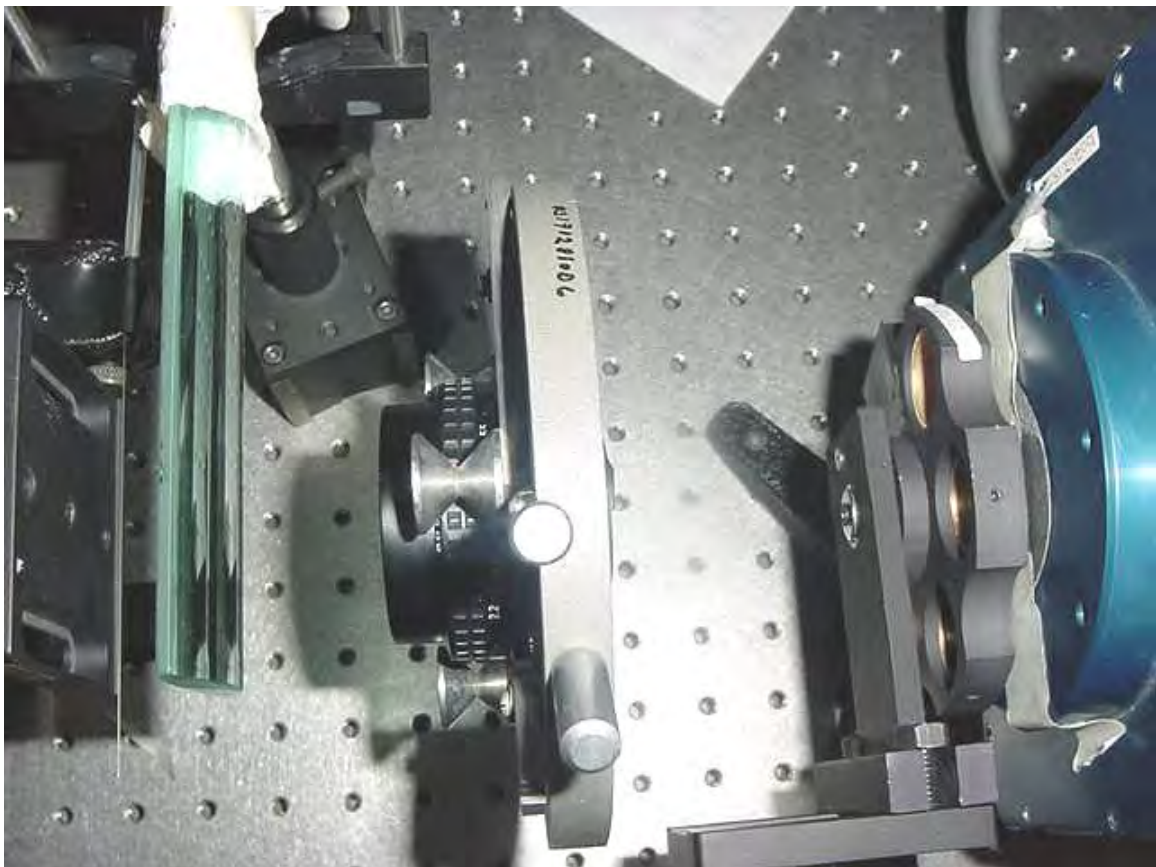


Figura 4.6 Disposición de la lente cilíndrica en el arreglo.

No obstante la notable mejora producida por la inclusión de la lente cilíndrica, la aparente fluctuación en la fibra y la no homogeneidad entre los valores de los píxeles adyacentes sugerían la posibilidad de que tales discrepancias se debieran al ruido introducido por la cámara. En el análisis de ruido ilustrado en la figura 4.9, generado mediante la comparación (sustracción) de dos imágenes de oscuridad tomadas consecutivamente por la cámara, se muestra mediante un histograma que la desviación estándar es de sólo 0.198. Tal valor arroja pruebas suficientes que determinan que la fuente de ruido no proviene de la cámara.

De igual forma, en otro análisis de ruido (figura 4.10), pero esta vez referente a la imagen de la fibra, se descubrió el elevado número de píxeles que, en términos efectivos, constituían una fuente de ruido para el cálculo de la razón de intensidad. Para eliminar dicha fuente de ruido se implementó un algoritmo de binarización para cada conjunto de píxeles de la imagen que se deben promediar, excluyendo a aquellos que se encuentran fuera de la región comprendida dentro de 2σ (desviación estándar) del histograma de intensidades.

4.2 Procesamiento Digital.

Dos técnicas se probaron para calcular la razón de intensidades. En la primera de ellas, el valor del píxel de la fibra es calculado primero mediante el promediado de los píxeles correspondientes en la imagen. Posteriormente se calcula la razón de intensidades entre los píxeles de la fibra ya calculados para las dos imágenes filtradas.

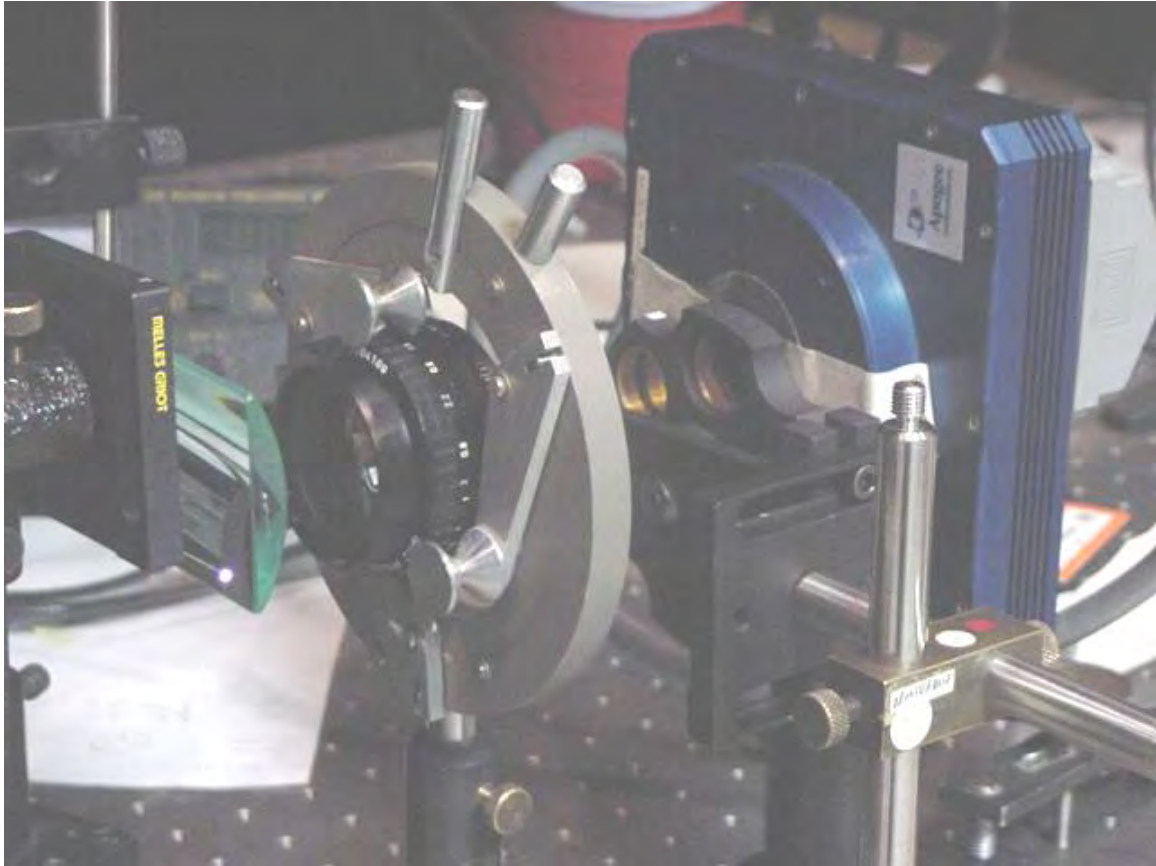


Figura 4.7 Disposición final del arreglo experimental. Pueden apreciarse la cámara termo enfriada, la montura revólver y el conjunto de lentes empleadas para la formación de imagen.

En la segunda técnica, primero se calcula la razón de intensidades entre las dos imágenes y después se promedia este valor entre todos los píxeles de la imagen que corresponden a un sólo píxel de la fibra. Se encontró que la segunda técnica era mucho más inmune a fluctuaciones debidas a la variación en el valor límite del primer filtro por binarización (empleado para eliminar la mayoría de los píxeles no deseados y para eficientar los cálculos sucesivos) del procesamiento digital.

Con el procesamiento digital descrito en los párrafos anteriores se logró que, en general, casi todas las fluctuaciones registradas en un principio se atenuaran. Así,

la pendiente negativa encontrada inicialmente, se corrigió por métodos estadísticos consiguiendo que la diferencia de temperaturas entre un extremo y el otro fuera de menos de 3 °C. La fluctuación entre píxel y píxel, no obstante, aún se encontraba presente. Como una forma de suavizar tal fluctuación, y tomando en cuenta que la información de cada píxel de la imagen corresponde a una zona cuadrada de la fibra de 3.3 μm de lado, se implementó un filtro de suavizado (pasabajas) a la información recabada.

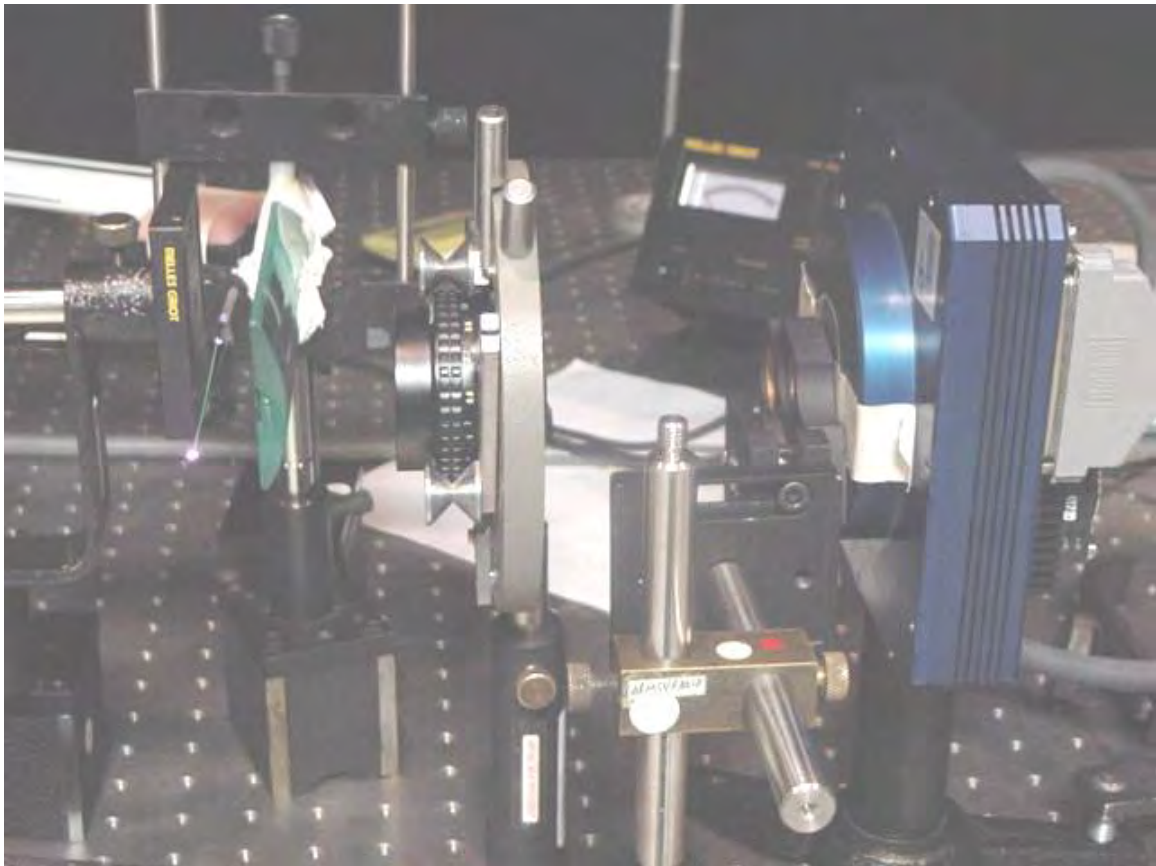


Figura 4.8 Disposición final del arreglo experimental.

El filtro consiste en asignar a cada píxel el valor promedio de un determinado número de píxeles adyacentes. Las gráficas que se muestran más adelante están

filtradas de manera que cada píxel corresponde al valor promedio de 10 píxeles adyacentes. En la figura 4.11 se muestra el cambio en la curva de razón de intensidades obtenido mediante la aplicación del filtro. En dicha figura (así como en las subsecuentes) el valor del cero se ha tomado en forma arbitraria en el extremo de la fibra por donde se bombea la radiación infrarroja. Sin embargo, se respetó para todas las mediciones esa misma referencia de manera que cada punto de la fibra siempre corresponde al mismo píxel en todos los casos.

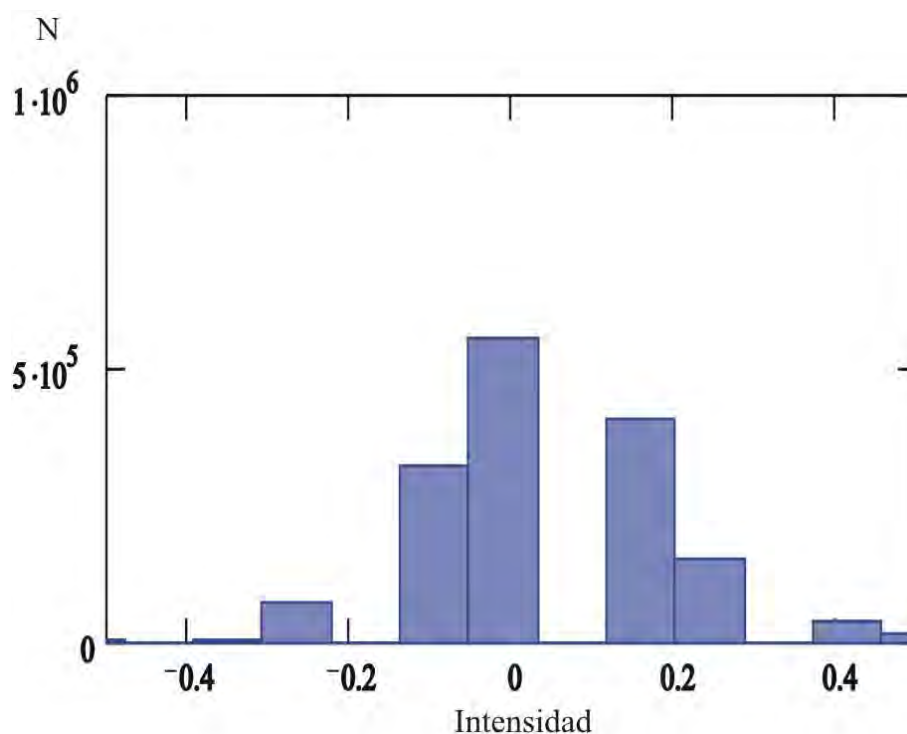


Figura 4.9 Distribución del ruido de oscuridad introducido por la cámara.

Después del filtro pasabajas la curva de razón de intensidades obtuvo finalmente un aspecto más coherente. No obstante, la fluctuación (ahora menor y de alrededor de $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$) entre píxel y píxel aún sugería la posibilidad de que tal comportamiento se debiera a algún tipo de error en la medición. Para descartar la

presencia de algún error sistemático, se desmontó y montó varias veces el arreglo, sufriendo en cada ocasión una leve modificación, para posteriormente realizar una serie de exposiciones con la cámara y de tal suerte verificar los resultados obtenidos. Es preciso señalar que, en todos los casos, las irregularidades en los valores entre píxeles permanecieron sin modificación.

Por último, la relación señal ruido en promedio para todos los píxeles obtenida es de 157.24.

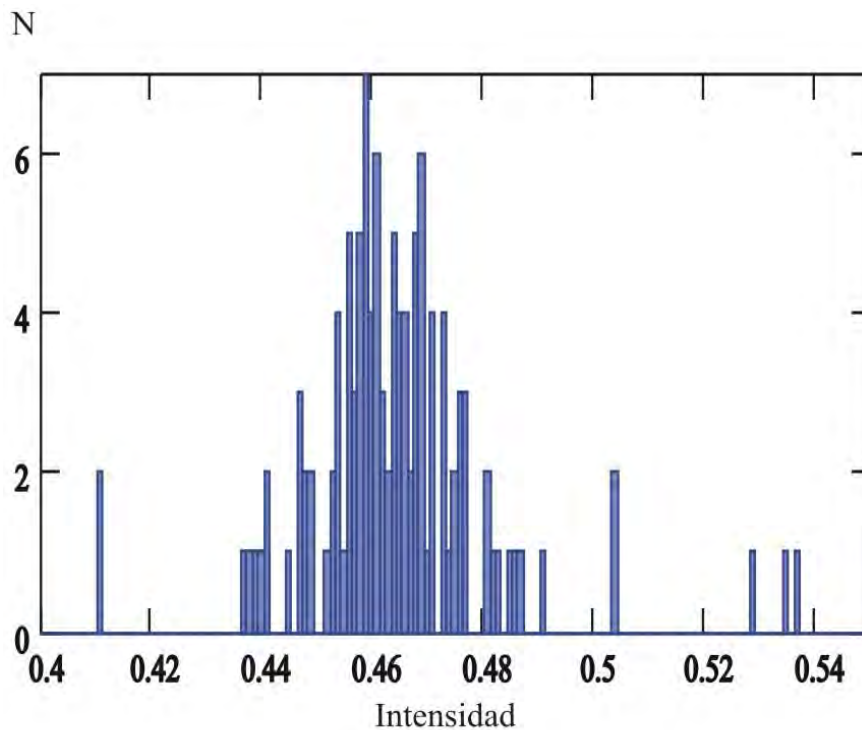


Figura 4.10 Histograma de una imagen filtrada típica de la fibra.

4.3 Repetitividad.

Como última prueba se realizaron varias exposiciones en forma consecutiva con la finalidad de determinar la repetitividad de la medición. La figura 4.12 muestra la

razón de intensidades a lo largo de la fibra para una serie de dos exposiciones consecutivas para cada par de imágenes. Es posible observar en la gráfica como las fluctuaciones se repiten en ambos casos y se encuentran en la misma posición. La figura 4.13 muestra el resultado de 5 exposiciones consecutivas y, de igual manera, es posible observar como las irregularidades se presentan siempre en el mismo sitio.

Lo anterior descarta por completo la idea de que las fluctuaciones se deban a un error en la medición. Más bien, indican que el origen de tales irregularidades proviene de la fibra misma. La inhomogeneidad en la distribución del dopante puede ser el factor que provoca que la razón de intensidades de fluorescencia fluctúe en forma específica en la fibra.

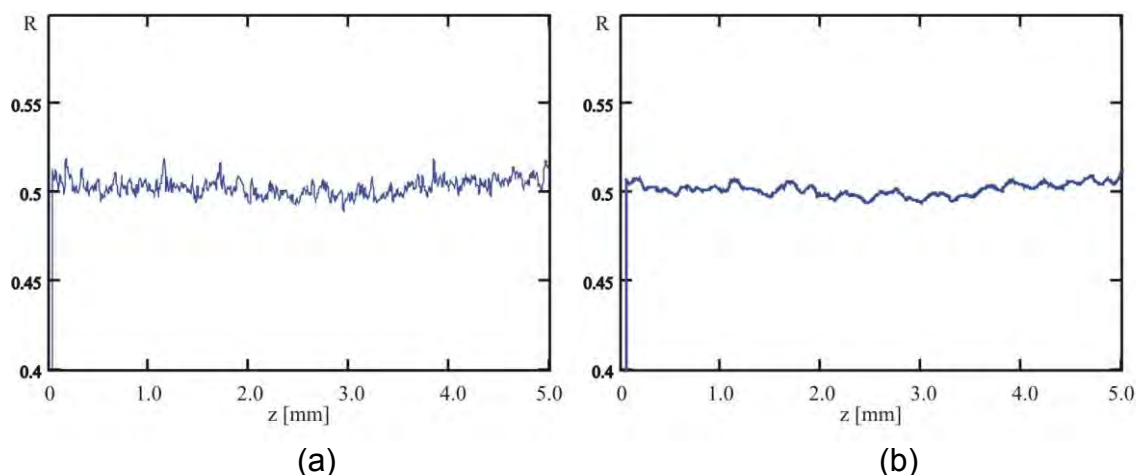


Figura 4.11 Razón de intensidades de la fluorescencia entre las bandas (532/550 nm) medida en forma longitudinal a lo largo de la fibra ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) (a) antes y (b) después del filtro pasabajas.

Como las fluctuaciones en la fibra siempre se presentan en el mismo lugar, la técnica propuesta es útil aún si la fibra se desplaza en relación al campo de vista

de la cámara pues es posible correlacionar la imagen de la fibra con una imagen de referencia.

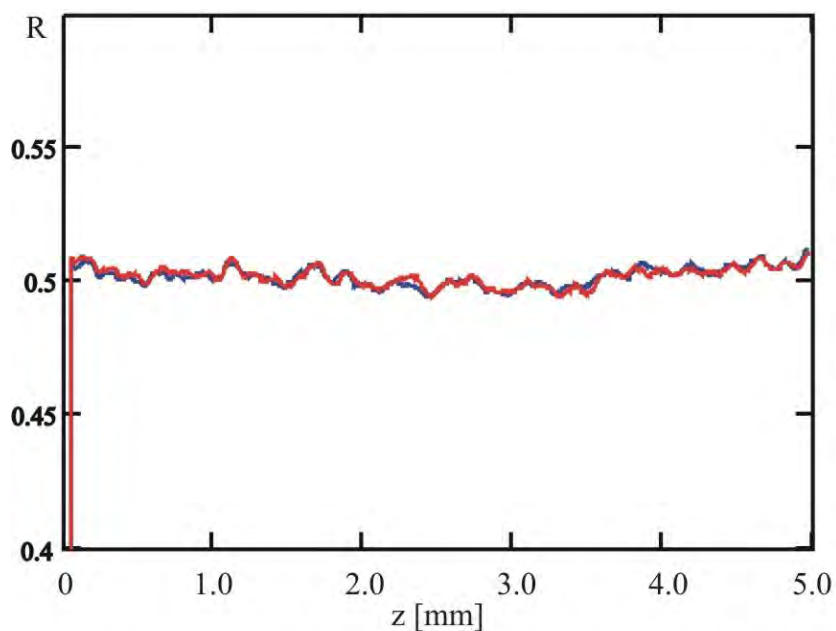


Figura 4.12 Repetitividad en 2 exposiciones de la razón de intensidades de la fluorescencia entre las bandas (532/550 nm) medida en forma longitudinal a lo largo de la fibra ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$).

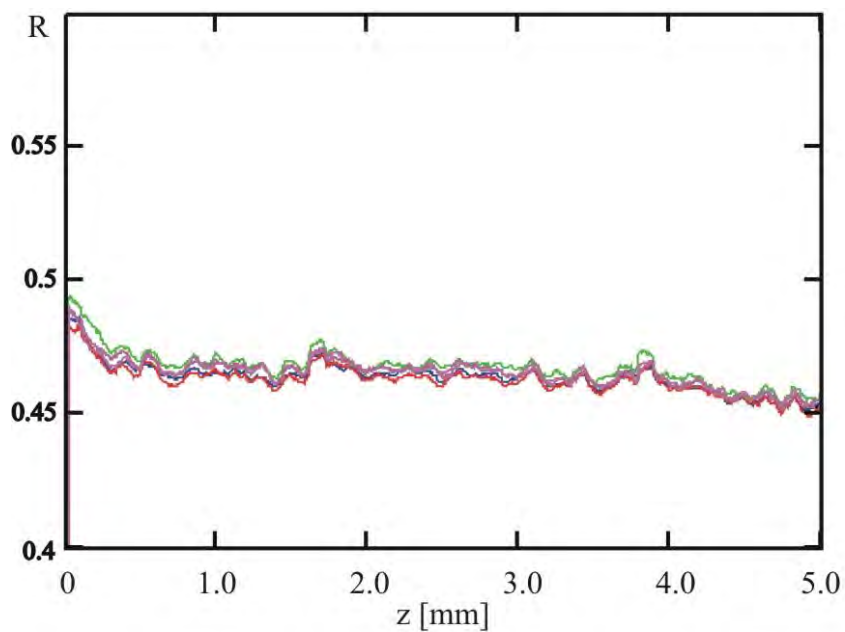


Figura 4.13 Repetitividad en 5 exposiciones de la razón de intensidades de la fluorescencia entre las bandas (532/550 nm) medida en forma longitudinal a lo largo de la fibra ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

4.4 Caracterización.

En el siguiente paso se comprobó que la razón de intensidades de la emisión por fluorescencia radial en las dos bandas portara información sobre la temperatura de la fibra. Para eso se adquirieron y procesaron dos imágenes digitales de la fibra al ser ésta sometida a diferentes temperaturas. Se tuvo especial cuidado en que la temperatura de la fibra fuera homogénea a lo largo de la sección que se fotografió. En la figura 4.14 se muestra el comportamiento en temperatura de la razón de intensidades vista en forma lateral. En esta primera prueba se tomaron datos a 12, 20 y 25 grados centígrados. Tal y como había sido reportado anteriormente en la literatura¹, en la figura es fácilmente reconocible el incremento en la razón de intensidades a medida que la temperatura se eleva. Tal comportamiento es el que se esperaba y resulta sumamente útil si lo que se desea es generar una imagen térmica.

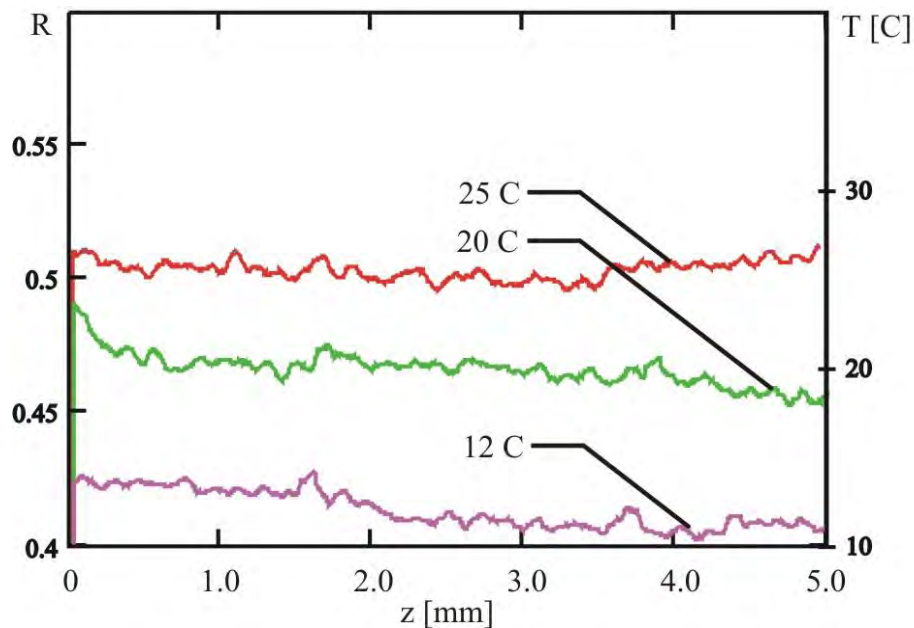


Figura 4.14 Cambio en la razón de intensidades de la fluorescencia entre las bandas (532/550 nm) medida en forma longitudinal a lo largo de la fibra con la temperatura como parámetro.

4.5 Calibración.

La obtención de la imagen térmica requiere de la caracterización del comportamiento de cada píxel del detector CCD. Éstos últimos corresponden a la imagen procesada (razón del valor entre dos adquisiciones) de una pequeña porción de la fibra ($3.3 \mu\text{m}$) y poseen un valor de intensidad (en 16 bits) relacionado directamente con su temperatura. Debe recordarse que en el CCD, y debido a la falta de homogeneidad del dopante, el valor de intensidad obtenido cambia de píxel a píxel para una misma temperatura en la fibra.

Para obtener el valor correcto de la temperatura en cada zona de la fibra (y de esa forma generar la imagen térmica) a partir de la intensidad en cada píxel del CCD, debe generarse una curva de calibración para cada uno de ellos. Tal calibración asignará a cada píxel del CCD un factor de corrección que modificará la lectura y proporcionará el valor correcto de temperatura.

Con el fin de generar la curva de calibración de cada píxel llevamos a cabo una excursión (que se muestra en la figura 4.15 y que es en realidad una ampliación de la prueba expuesta en la figura 4.14, aunque generada en una zona distinta de la fibra, y por lo tanto, con curvas diferentes) que presentara el comportamiento de la razón de intensidades en cada píxel de la fibra para un mayor número de temperaturas. En la nueva excursión, la inhomogeneidad en el dopante generó datos de razón de intensidad por demás irregulares para cada temperatura. Sin embargo este fenómeno, aunque no deseado, resulta irrelevante gracias a la

caracterización que se le hará a cada píxel, y al hecho de que, como puede observarse, las fluctuaciones siempre ocurren en forma regular con respecto a la temperatura, o lo que es lo mismo, el valor de intensidad se muestra claramente dependiente de la temperatura únicamente.

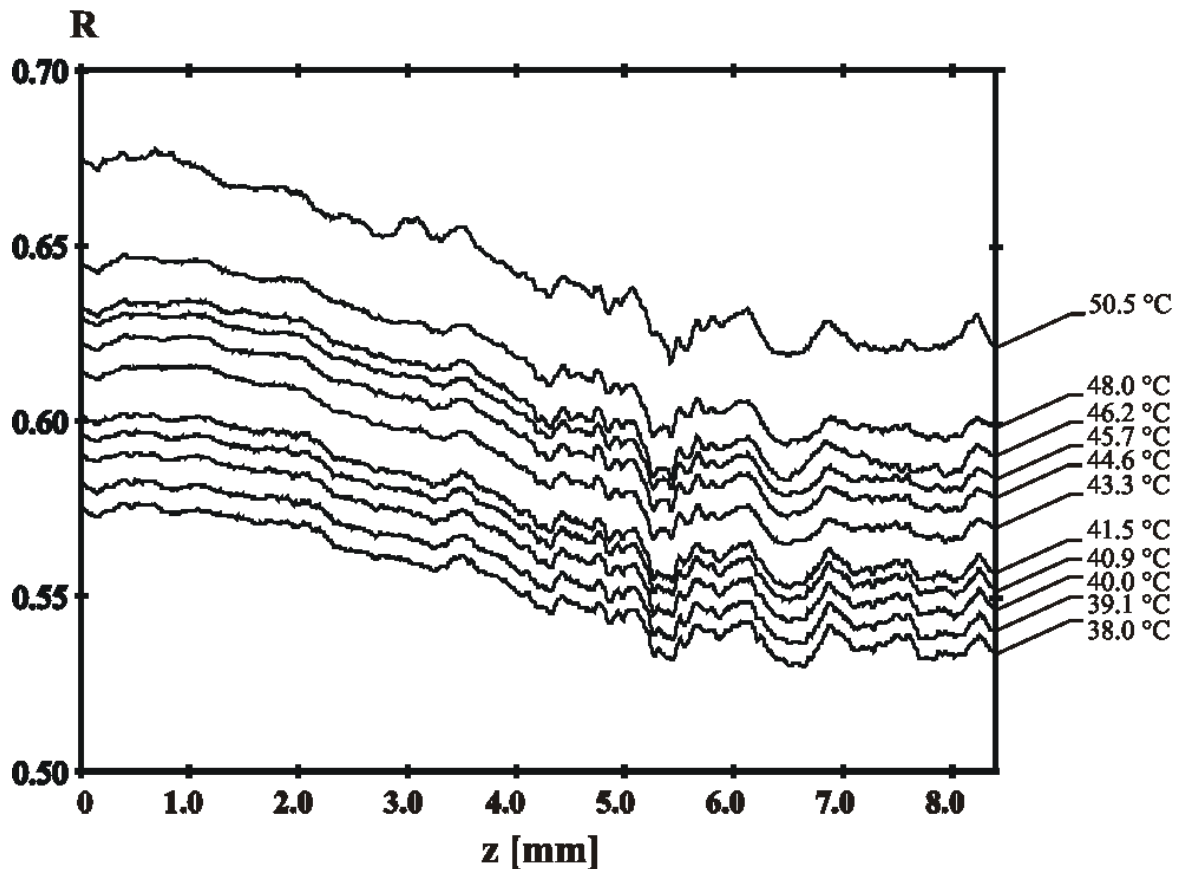


Figura 4.15 Excursión de temperatura que muestra el cambio en la razón de intensidades de la fluorescencia entre las bandas (532/550 nm) medida en forma longitudinal a lo largo de la fibra.

De mayor relevancia resulta el hecho de que las diferencia de 0.5 °C entre las mediciones de 46.2 °C y 45.7 °C es claramente discernible. De hecho, con los 16 bits (12 bits reales) disponibles en las imágenes capturadas con nuestro detector, en teoría es posible discernir diferencias en la temperatura de 0.066 °C.

Con los datos recabados en la excursión, se verificó la relación entre la temperatura y la razón de intensidades para cada uno de los píxeles. La figura 4.16 exhibe dicha relación para 9 píxeles en particular. Las curvas sugieren que todos los píxeles se comportan en forma lineal, al menos para este rango de temperaturas, y lo hacen de igual manera (igual pendiente) mientras que el desplazamiento en el eje de las abscisas se debe únicamente a la inhomogeneidad en el dopante.

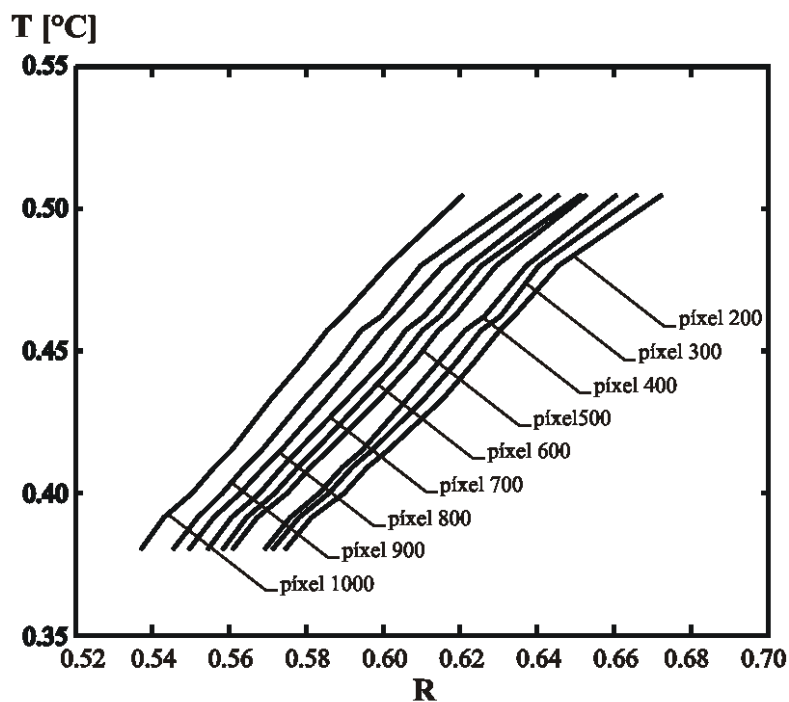


Figura 4.16 Temperatura de la fibra en función de la razón de intensidades medida en cada píxel.

En la figura 4.17 se muestra el ajuste lineal de los datos recabados experimentalmente. Cada una de estas curvas representa la curva de calibración de su píxel respectivo, y está descrita por la ecuación

$$T_p = T_{o(p)} + M_{(p)} \cdot R \quad (4.1)$$

Aquí, T_p representa la temperatura real del píxel, $T_{o(p)}$ y $M_{(p)}$ el valor de la ordenada al origen y de la pendiente de la curva de calibración de cada píxel respectivamente y R el valor de la razón de intensidades obtenido.

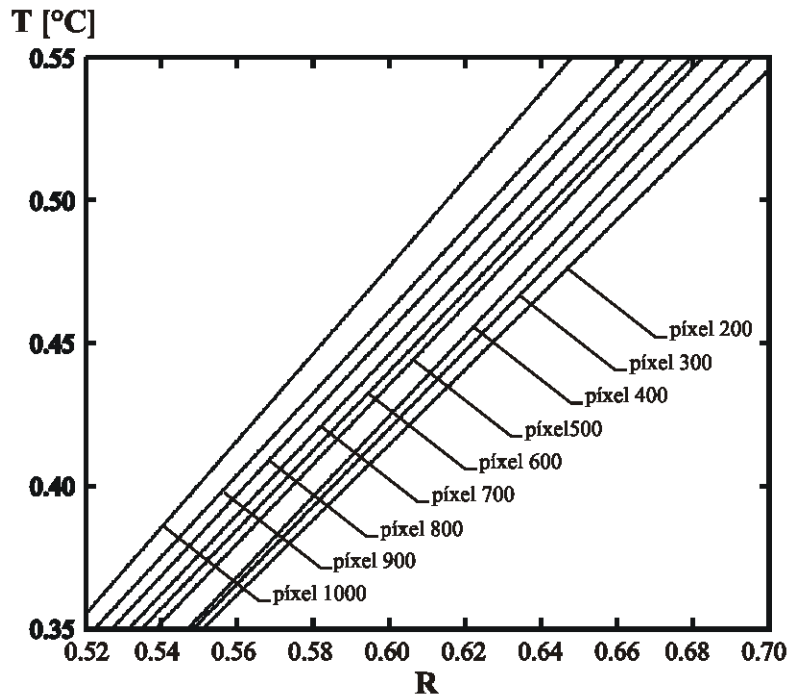


Figura 4.17 Ajuste de la función de la temperatura de la fibra con respecto de la razón de intensidades en cada píxel.

Por lo tanto, para determinar la temperatura real de cada zona de la fibra (píxel de la fibra) a partir del valor de intensidad en cada píxel del CCD sólo basta corregir cada píxel de acuerdo a la ecuación 4.1. Los valores de $T_{o(p)}$ y $M_{(p)}$ para cada uno

de los 1536 píxeles del detector se han calculado (para esta zona de la fibra) y se presentan en las figuras 4.18 y 4.19.

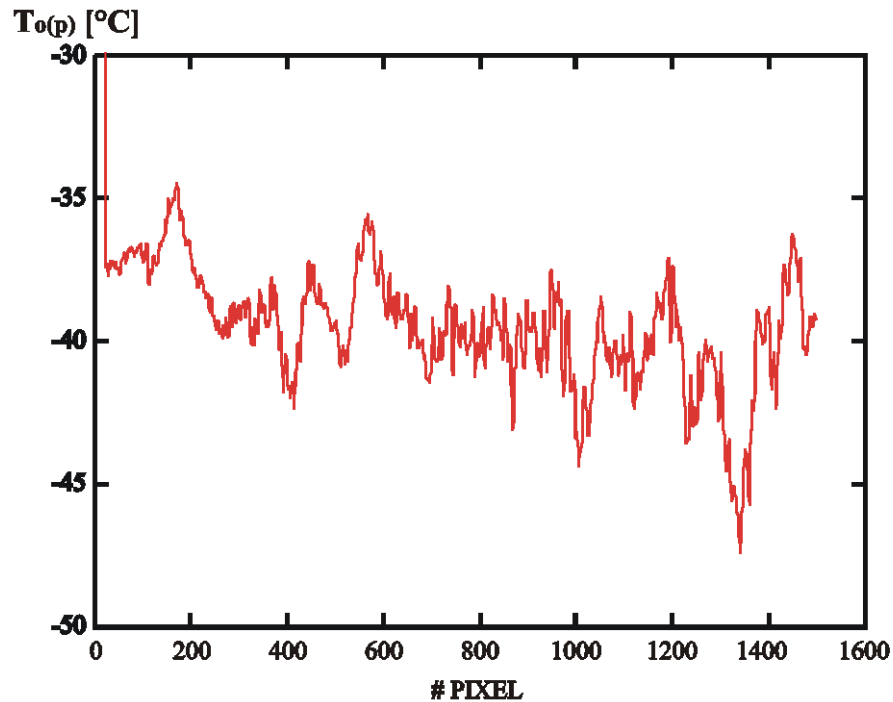


Figura 4.18 Valor de la ordenada al origen ($T_{o(p)}$) de la curva de calibración para cada píxel.

Con respecto a la pendiente (correspondiente a la sensibilidad) de cada curva de calibración, debe señalarse que, aunque se consideró en un inicio como constante, en realidad varía de píxel a píxel en forma considerable (valor medio de 139.087 con una desviación estándar de 17.5) y, por lo tanto, es recomendable emplear su valor real en cada caso. Sobra decir que una vez ajustado el valor de cada píxel con los valores calculados anteriormente, la curva de razón de intensidades en cada píxel para una temperatura dada (es decir la gráfica 4.15) sería aquella de una recta horizontal.

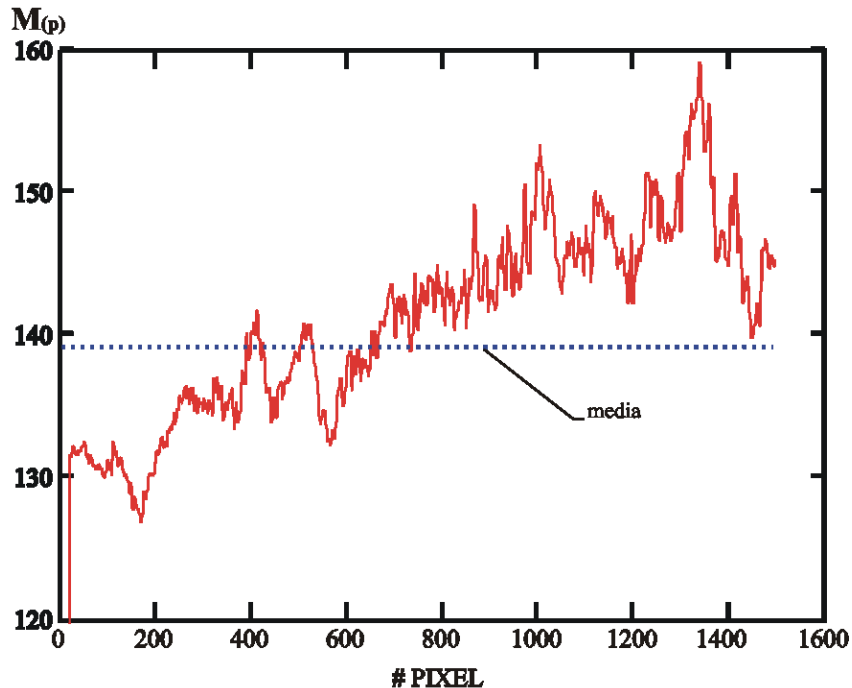


Figura 4.19 Pendiente media y valor de la pendiente ($M(p)$) de la curva de calibración para cada píxel.

Así, en la implementación futura de un convertidor de IR a Visible del tipo propuesto en este escrito, sería necesaria la calibración de todos los píxeles en la forma aquí descrita.

Con los datos experimentales recabados en este estudio es posible ver ahora un panorama más claro sobre la factibilidad y las cualidades y limitaciones del convertidor propuesto. Se ha confirmado que la fibra se comporta bien al “convertir” la información de su temperatura (vinculada con un calentamiento que puede deberse a irradiación con IR) en información en el visible. Con “buen comportamiento” nos referimos a que efectivamente es posible conocer el valor de la intensidad de fluorescencia radial en la fibra, y que con tal información es posible discernir aumentos en la temperatura de la fibra de al menos 0.5°C (debido

a la incertidumbre en el sensor de temperatura con la que se monitoreaba la fibra) en forma experimental (aunque en teoría, con los 12 bits reales de nuestro detector, tal diferencia puede ser de al menos 0.066 °C). Hemos encontrado también que las irregularidades en los datos obtenidos (y que se deben a la inhomogeneidad del dopante) pueden ser compensadas y sorteadas mediante la calibración del detector CCD.

Con cámaras de alta sensibilidad y con la configuración actual, hemos podido detectar la bajísima emisión de fluorescencia en las bandas de nuestro interés en tiempo real (30 cuadros por segundo). Como trabajo futuro, caracterizaremos el comportamiento del convertidor para determinar experimentalmente la resolución espacial y temporal del dispositivo en tiempo real.

CONCLUSIONES

Con la información recabada en el presente estudio es posible hablar sobre la factibilidad de implementar un convertidor de radiación IR a visible que pueda ser empleado para la generación de termografías e imágenes térmicas.

La simulación numérica presentada en el capítulo 3 del presente escrito aporta datos suficientes que sugieren un comportamiento teórico en términos de resolución espacial y temporal satisfactorios incluso para la generación de imágenes en tiempo real.

Para garantizar la resolución espacial, utilizando el criterio de Rayleigh, la distancia mínima que puede existir entre dos píxeles de la fibra (zonas expuestas a radiación) debe ser de al menos 3 veces el diámetro de la fibra (hasta el cladding). A su vez, el área proyectada del elemento sensor es rectangular, y se optó por hacerla cuadrada y con su lado igual al diámetro de la fibra. De esta forma, en nuestra fibra de 125 μm de diámetro la distancia entre centros de los píxeles es de 375 μm . Así mismo, cada elemento sensor presenta un área proyectada de 125 x 125 μm . Podemos concluir a partir del modelo que la resolución espacial es dependiente en forma lineal con diámetro de la fibra. Si el diámetro baja, la resolución aumenta.

En términos de resolución temporal, en modelo numérico encontramos que al colocar la fibra en contacto con un sumidero de calor, la transferencia de calor garantiza la repetitividad de cada evento, a velocidades que es posible el empleo del convertidor en aplicaciones de video a ~30 cuadros por segundo (se puede lograr un ciclo de calentamiento y enfriamiento en ~ 30 ms).

Los datos experimentales recabados en este estudio, por su parte, aportan un panorama más claro sobre la factibilidad y las cualidades y limitaciones del convertidor propuesto.

Por una parte, hemos caracterizado la fibra en términos de razón de intensidades contra temperatura, observando la fluorescencia en forma lateral, y hemos comprobado que su relación es lineal.

Las mediciones nos han confirmado que la fibra es capaz de convertir la información de su temperatura en información en el visible. Así, hemos comprobado la posibilidad de discernir aumentos en la temperatura de la fibra de al menos 0.5°C en forma experimental aunque en teoría tal diferencia puede ser de al menos 0.066°C con los doce bits reales en nuestro detector (Si el detector alcanzara los 14 bits reales la resolución teórica bajaría hasta 0.0085°C).

Así mismo, las irregularidades en la distribución del dopante en la fibra pueden ser compensadas mediante la calibración del detector CCD.

Podemos concluir que el convertidor propuesto en este escrito es factible. Aún más, sus propiedades (resolución espacial, temporal y de temperatura) le atribuyen un gran potencial como alternativa de bajo costo en la generación de imágenes térmicas y termografías.

Cámaras de alta sensibilidad nos han permitido, con la configuración actual, observar la bajísima emisión de fluorescencia en las bandas de nuestro interés en tiempo real (30 cuadros por segundo). Como trabajo futuro, caracterizaremos el comportamiento del convertidor en términos temporales y espacio-temporales para determinar la resolución espacial y temporal del dispositivo en tiempo real.

REFERENCIAS

1. G. Paez, M. Strojnik, "Performance predictions of a Fiber Optic Temperature Sensor," *Infrared Spaceborne Remote Sensing X*, Proc. SPIE **4818**, 100-109 (2002).
2. 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).
3. 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).
4. E. Maurice, G. Monnom, B. Dussardier, A. Saisy, D. Ostrowsky, G. Baxter, "Erbium-doped silica fibers for intrinsic fiber-optic temperature sensor," *Appl. Opt.* **34**, 8019 (1995).
5. 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).
6. <http://www.flirthermography.com>.
7. <http://www.infraredsolutions.com/>
8. <http://www.indigosystems.com/product/cameras.html>
9. M. Strojnik, G. Paez, J. Castellon-Urbe, "Radiometric analysis of a fiber optic temperature sensor," *Opt. Eng.* **41** (06), 1255-1261 (2002).

10. 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).
11. W. Smith, *Modern Optical Engineering*, p. 162, (Mc Graw Hill, New York, 2000).
12. M. Y. Kleinerman, "Infrared Image Converter," *Unites States Patent 3,639,735*, (1972).
13. M. Y. Kleinerman, "Infrared detection and imaging, method and apparatus," *Unites States Patent 4,061,578*, (1977).
14. 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).
15. 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).
16. K. Wickersheim, "Luminescent decay time measurements by use of a CCD camera," *Unites States Patent 5,304,809*, (1994).
17. 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).
18. Sergio Calixto, Martín Salazar, Manuel Servin, "Photosensitive element for an infrared-to-visible image converter," *App. Opt.* **34**, 3589-3594, (1995).

19. J. Ahearn, "Infrared image converter," *Unites States Patent 5,519,529*, (1996).
20. 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).
21. 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).
22. L. Portsel, Y. Astrov, "Glow dynamics in a semiconductor-gas discharge image converter," *J. Appl. Phys.* **81**, 1077-1086, (1997).
23. R. Hayes, "Infrared to visible light image conversion device," *Unites States Patent 5,703,363*, (1997).
24. M. Y. Kleinerman, "Optical systems for sensing temperature and thermal infrared radiaton," *Unites States Patent 5,820,265*, (1998).
25. M. S. Scholl, "Thermal considerations in the design of a dynamic IR target," *Appl. Opt.* **21**, 660 (1982).
26. M. S. Scholl, "Spatial and temporal effects due to target irradiation: a study," *Appl. Opt.* **21**, 1615 (1982).
27. M. S. Scholl, "Target temperature distribution generated and maintained by a scanning laser beam," *Appl. Opt.* **21**, 2146 (1982).
28. J.P. Holman, "Heat Transfer," McGraw-Hill, New York, (1968).