

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



---

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

SENSOR DE FLUJO DE CALOR BASADO EN UN SISTEMA DE  
FIBRA ÓPTICA EN CONFIGURACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO**

PRESENTA:  
**ALDO JORGE GUTIÉRREZ ARROYO**

DIRECTORA DE TESIS:  
*DRA. CELIA A. SÁNCHEZ PÉREZ*



CIUDAD UNIVERSITARIA 2011

**AGRADECIMIENTOS**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Al finalizar un proyecto tan arduo y lleno de dificultades como el estudio de una carrera universitaria, así como el desarrollo de una tesis, es inevitable el asalto de un muy humano egocentrismo que me lleva a concentrar la mayor parte del mérito a mi aporte individual. Sin embargo, el análisis objetivo me muestra inmediatamente que la magnitud de ese aporte hubiese sido imposible sin la participación de personas e instituciones que han contribuido para librar este peldaño de mi vida. Por ello, es para mí un verdadero placer utilizar este espacio para expresarles mis sinceros agradecimientos.

Esta tesis de licenciatura fue realizada gracias al apoyo de **las siguientes** instituciones: el Grupo de Sensores Ópticos y Eléctricos del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM, que me brindo sus instalaciones e instrumentos durante los 11 meses de duración del proyecto. Asimismo, el Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal, que me otorgó una beca dentro del proyecto “Sistema de tomografía mamaria basado en técnicas fototérmicas.”. También agradezco el financiamiento del proyecto PAPIIT IN120309.

En primera instancia agradezco profundamente a Dios, por haber colmado mi existencia de fortaleza y saber que se encuentra presente en cada paso que doy, por clarificar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio, después de todo Él no juega a los dados

Mi agradecimiento es total hacia mis padres y mi hermana, quienes a pesar de la distancia procuraron mi bienestar y que a lo largo de mi vida han guiado con sapiencia mis pasos, por ello destaco su protagonismo en este logro personal, el cuál no es más que el inevitable fruto de su esfuerzo y trabajo. Siempre tendré presente su ejemplo que me motiva para continuar bajo cualquier circunstancia. De igual manera agradezco profundamente al resto de mis familiares, quienes me brindaron alegrías y satisfacciones, y que influyeron directamente en el ánimo para comenzar una nueva semana.

Agradezco a mis compañeros de habitación por convertir en amena mi estadía en México, de ellos siempre recordaré sus mejores facetas e interminables sandeces. Y también a Steph, mi fiel compañera en este andar, la solidaridad recíproca llevó a la culminación de ambas carreras. Igualmente agradezco a Fer y Normita, a quienes recurrí en momentos sumamente difíciles y de quienes recibí el apoyo que únicamente la familia puede brindar.

También agradezco al Dr. Eduardo Sandoval quien me recibió por primera vez en CCADET y me brindo un apoyo sincero. De igual forma agradezco al Dr. Augusto García, de quién recibí una atenta supervisión durante el proyecto.

Finalmente, debo agradecer de manera especial y sincera a la Dra. Celia Sánchez Pérez por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección. Su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas ha sido un aporte invaluable. Le agradezco también el haberme facilitado siempre los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo del proyecto.

ÍNDICE

<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Antecedentes.....</b>	<b>3</b>
1.1 Calor.....	3
1.1.1 Mecanismos de transferencia de calor.....	3
1.1.1.1 Conducción.....	3
1.1.1.2 Convección.....	4
1.1.1.3 Radiación.....	5
1.1.2 Flujo de calor.....	5
1.1.3 Definición del efecto fototérmico.....	7
1.1.4 Deflexión de un haz debido al efecto fototérmico.....	8
1.2 Propagación de un haz en una fibra óptica monomodal.....	8
1.3 Haz gaussiano.....	11
1.3.1 Colimación de un haz gaussiano.....	11
1.4 Sensores de intensidad.....	12
1.4.1 Clasificación.....	13
1.4.2 Parámetros de funcionamiento.....	13
1.5 Sensores de flujo de calor publicados recientemente.....	14
1.6 Conclusiones del capítulo.....	18
<b>2. Diseño del Sensor de Flujo de Calor con Trayectoria Lineal.....</b>	<b>19</b>
2.1 Características de diseño del sensor.....	19
2.1.1 Principio de funcionamiento del sensor de flujo de calor....	19
2.1.2 Esquema del sensor de flujo de calor con trayectoria lineal.....	21
2.1.3 Resultados experimentales.....	22
2.1.3.1 Caracterización del ruido mecánico.....	22
2.1.3.2 Sensor de ángulo.....	24
2.1.3.2.1 Caracterización del sensor de ángulo.....	28
2.1.3.3 Medición de flujo de calor con trayectoria lineal.....	29
2.1.3.4 Calibración del sensor de flujo de calor con trayectoria lineal.....	30
2.2 Limitaciones del sensor de flujo de calor.....	32
2.3 Conclusiones del capítulo.....	32

<b>3. Diseño del sensor de flujo de calor en configuración de reflexión múltiple.....</b>	<b>34</b>
3.1 Características del sensor en configuración de reflexión múltiple.....	34
3.1.1 Esquema de la configuración de múltiples reflexiones.....	34
3.1.2 Montaje experimental.....	36
3.1.3 Ajuste mecánico.....	38
3.2 Resultados experimentales.....	39
3.2.1 Medición de flujo de calor.....	39
3.2.2 Calibración del sensor en la configuración de múltiples múltiples reflexiones.....	40
3.3 Medición de flujo de calor en tejido hepático aviar.....	43
3.4 Conclusiones del capítulo.....	46
<b>4. Conclusiones generales.....</b>	<b>48</b>
<b>5. Referencias bibliográficas.....</b>	<b>50</b>
<b>6. Apéndices .....</b>	<b>52</b>

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de tesis fue realizado en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) bajo la dirección de la Dra. Celia Angelina Sánchez Pérez. Éste presenta el diseño de un sensor de flujo de calor en una nueva configuración llamada Múltiples Reflexiones para ser utilizado en la caracterización de las propiedades térmicas de tejido biológico. El sistema de sensado está basado en el cambio de potencia de un haz de luz, medido por desacoplamiento del perfil modal en fibras ópticas, debido a la deflexión que se origina cuando éste viaja a través de un material termo-óptico expuesto a una fuente de calor.

Actualmente existen diversas técnicas de medición de flujo de calor utilizando sistemas ópticos como una alternativa al riesgo de utilizar sensores eléctricos en ambientes explosivos o para evitar el desgaste los materiales metálicos de la cabeza de sensado en medios corrosivos. Los sensores ópticos también ofrecen grandes ventajas sobre otros sistemas como alta sensibilidad, son ligeros, tienen la posibilidad de sensado remoto, su costo es bajo y por supuesto, presentan la propiedad de inmunidad a la interferencia electromagnética.

Los sensores de flujo de calor son ampliamente utilizados en áreas entre las que se pueden destacar: estudios meteorológicos, caracterización de materiales, en física de suelos, en la medicina, además se encuentran presentes en numerosos procesos industriales[1]. Dentro de los trabajos presentados recientemente para la medición de flujo de calor se tienen los sensores que miden el flujo a través de termopilas[2,3], los sensores basados en fibra óptica[4,5], los sensores que utilizan interferometría[6] y también los que aplican calorimetría directa[7,8].

El diseño del sensor de flujo de calor en configuración de múltiples reflexiones busca como objetivo fundamental aumentar la sensibilidad con el sistema desarrollado anteriormente en el CCADET por el grupo de la Dra. Celia Sánchez Pérez y proponer un nuevo esquema, donde las dimensiones del sensor sean disminuidas. En el prototipo inicial[5] se planteó que la sensibilidad se aumentaba al hacer el recorrido del haz más largo. Sin embargo, esto implicaba aumentar las dimensiones del sistema dado que el recorrido era lineal. En este trabajo de tesis se propone incorporar un esquema de recorrido del haz donde realicé reflexiones múltiples, manteniendo relativamente las dimensiones del sensor e incrementando la sensibilidad ocasionada por la extensión de la trayectoria óptica. Se busca que tanto la resolución como la sensibilidad sean capaces de detectar variaciones de flujo de calor menores, de tal manera que el diseño final del sensor de flujo de calor se utilice para caracterizar tejido biológico a partir de sus parámetros térmicos, y que éste cimente las bases para diseñar una sonda que identifique y caracterice la modificación de las propiedades térmicas del tejido ocasionado por alguna patología.

El manuscrito está organizado de la siguiente manera: En el capítulo 1 se analiza el estado del arte y los conceptos fundamentales que permitirán entender el funcionamiento del dispositivo diseñado.

Posteriormente en el capítulo 2 se presentan los resultados experimentales de la calibración del sensor de flujo de calor con trayectoria lineal. También se aborda una propuesta para mejorar la estabilidad mecánica del sistema, así como un montaje experimental que permita caracterizar la respuesta del sensor de ángulo en fibra óptica. Como conclusión de este apartado, se analizan las limitaciones que presenta esta configuración, con la finalidad de optimizarlas en el diseño final.

Finalmente, en el Capítulo 3 se describe el diseño de la configuración de reflexiones múltiples del sensor de flujo de calor, donde se busca incrementar la longitud del camino óptico que ocasione por ende el aumento de la sensibilidad del sistema. Se pretende que el número de reflexiones internas sea el máximo considerando las dimensiones físicas del sensor, que están directamente relacionadas con los dispositivos de fibra óptica utilizados para el sensor de ángulo y con las características del tejido biológico a caracterizar. También se caracterizan algunos parámetros de funcionamiento del sensor tales como rango de operación, resolución y sensibilidad. La culminación de este capítulo es una aplicación biomédica, en la que se realizan mediciones del cambio en la transferencia de calor para una muestra hepática aviar, a la que se le provoca un cambio en sus propiedades físicas.

## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

El objetivo de este capítulo es brindar los antecedentes teóricos para describir el funcionamiento del sensor de flujo de calor propuesto. Particularmente se documentan las propiedades térmicas involucradas en este trabajo de tesis, tales como son el efecto fototérmico y la definición de flujo de calor, debido a que cumplen una función protagónica en la conducción del calor. Posteriormente, se explica la deflexión que sufre un haz de luz en su trayectoria cuando atraviesa un material termo óptico expuesto a un gradiente de temperatura. Además se analiza la forma del modo fundamental que se propaga en una fibra óptica monomodal con el fin de exponer su naturaleza gaussiana misma que será utilizada en los análisis teóricos del sensor. Por último, se describen algunos de los dispositivos de sensado de flujo de calor publicados recientemente, detallando su clasificación, parámetros de medición y principio de funcionamiento.

### 1.1 Calor

La termodinámica es una ciencia que comprende el estudio de las transformaciones energéticas y de las relaciones entre las propiedades físicas de las sustancias afectadas por dichas transformaciones. Los científicos que trabajan en estos campos han desarrollado los principios básicos que rigen el comportamiento físico y químico de la materia con respecto a la energía. Su estudio da origen a la definición de calor, que es la energía en tránsito que tiene lugar como resultado de las interacciones entre un sistema y sus alrededores, debido a una diferencia de temperatura. Este intercambio de energía (medido en [J]) fluye a través de una barrera termodinámica por lo que la transferencia de calor  $Q$ , es la tasa a la cual esta energía se mueve a través de la barrera.

#### 1.1.1 Mecanismos de transferencia de Calor

Existen tres mecanismos de transferencia de calor, llamados: conducción, convección y radiación. En la naturaleza, estos mecanismos intervienen simultáneamente con distintos grados de importancia. Cada uno de estos modos pueden estudiarse separadamente, si bien la mayoría de las aplicaciones en ingeniería son combinaciones de las tres formas. No obstante, un estudio profundo de los mecanismos asociados a cada una de las formas mencionadas anteriormente permite extender fácilmente el análisis al problema combinado.

##### 1.1.1.1 Conducción

Es la transferencia de calor a través de un material estacionario, tal como un sólido o un fluido en reposo o régimen laminar. Este tipo de transmisión no involucra un movimiento relativo de las partículas del cuerpo y por tanto se define como difusión de energía debida a un movimiento molecular aleatorio. La propagación del calor a través de la conducción presenta las siguientes características:

- La existencia de un material a través del cual se propaga el calor
- Se transmite el calor sin transporte de materia.

# 1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

La conducción del calor en muchos materiales puede visualizarse como resultado de los choques moleculares, como en el caso de líquidos y gases, o movimiento de electrones o vibraciones de la red cristalina, como el caso de los sólidos. Al chocar las moléculas calientes (más rápidas) con sus vecinas frías (más lentas) les transfieren algo de su energía, y la velocidad de las vecinas aumenta por ende, dando como resultado la propagación de la energía asociada al movimiento térmico (conducción). Lo mismo puede decirse para los sólidos respecto del movimiento de los electrones o las vibraciones de la red cristalina.

Para conducción de calor se utiliza la ley de Fourier que para una dimensión puede expresarse como:

$$q_{cd} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.1)$$

Donde:  $q_{cd}$  es el flujo de calor en la dirección  $x$

$k$  es la conductividad térmica del material

$\frac{\partial T}{\partial x}$  es el componente del gradiente de temperatura en la dirección de propagación

## 1.1.1.2 Convección

Es la transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido por medio de la mezcla. Físicamente puede entenderse como una difusión de energía debida a un movimiento molecular aleatorio más una transferencia de energía debida a un movimiento en todo el volumen (advección). La convección se clasifica a su vez en forzada o natural, según que la mezcla se realice o no por medios mecánicos (bombas, ventiladores, etc.). Aunque los líquidos y los gases no suelen ser muy buenos conductores de calor, pueden transmitirlo eficientemente por convección. La propagación del calor a través de la convección se caracteriza por:

- Debe existir un medio material fluido a través del cual se propaga el calor.
- Variación de la densidad del medio con la temperatura y la aceleración de la gravedad juega un rol importante, sin ella no hay convección.
- Transmisión de calor con transporte de materia.

En la convección de calor se tiene la ley de Newton:

$$Q_{cv} = h(T_s - T_\infty) \quad (1.2)$$

donde:  $h$  es el coeficiente de convección

$T_s$  es la temperatura de la superficie

$T_\infty$  es la temperatura del fluido

## 1.1.1.3 Radiación

Es la transferencia de calor debida a la energía emitida por todos los cuerpos en forma de ondas electromagnéticas, viajando a la velocidad de la luz y propagándose aun en el vacío. La propagación del calor a través de la radiación se caracteriza por:

- No es necesario que exista un medio para que se produzca la radiación.
- Transmisión de calor sin transporte de materia.

La radiación del Sol se produce principalmente en la zona visible y en otras longitudes de onda a las que el ojo no es sensible, como la infrarroja, que es la principal responsable del calentamiento de la Tierra.

Para radiación de calor la ley de Stefan-Boltzman establece:

$$Q_{rd} = \epsilon \sigma_{SB} T_s^4 \quad (1.3)$$

donde:  $\sigma_{SB}$  es la constante de Stefan-Boltzman

$T_s$  es la temperatura absoluta de la superficie

$\epsilon$  es la emisividad de la superficie

En líquidos y gases, la convección y la radiación son de gran importancia, pero en sólidos la convección está ausente y la radiación es usualmente despreciable, es por esto que para muchas pruebas experimentales en sólidos es sólo necesario considerar el efecto producido por la conducción de calor.

## 1.1.2 Flujo de calor

El flujo de calor se define como la tasa de energía térmica transferida por unidad de área y  $[W/m^2]$  son sus unidades en el SI. Está dado por la diferencial  $dQ/dt$ , es decir el calor que fluye por una barra de material de área transversal  $A$  en la unidad de tiempo, es proporcional a la diferencia de temperatura de sus extremos ( $T_C - T_F$ ), al área transversal  $A$  e inversamente proporcional a la longitud  $l$  de la barra, y se define por:

$$H = \frac{dQ}{dt} = -k \cdot A \cdot \frac{T_c - T_f}{l} \quad (1.4)$$

donde  $k$  una constante de proporcionalidad, llamada conductividad térmica, la cual caracteriza cada material. En general el subíndice  $f$  lo usé para designar el extremo frío y  $c$  para designar el extremo caliente, lógicamente  $T_c > T_f$ .

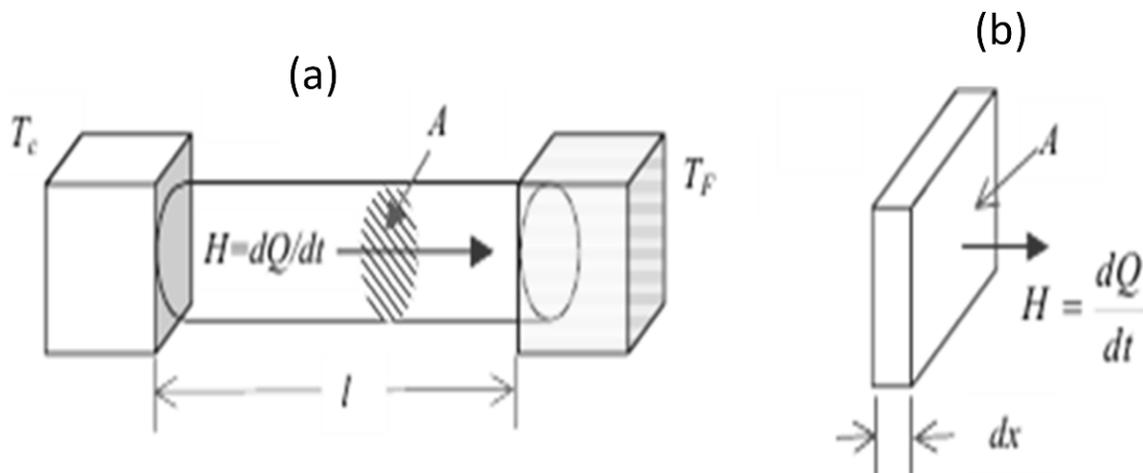


Figura 1.1 (a) Transmisión del calor a lo largo de una barra de materia, aislada por las caras laterales, de longitud  $l$  con un extremo caliente ( $T_c$ ) y el otro frío ( $T_f$ ). (b) Transmisión de calor a través de un elemento de materia de espesor infinitesimal  $dx$ .

El cociente  $(T_c - T_f)/l$  se denomina el gradiente térmico de la barra. En general el gradiente térmico en cada punto de la barra se define por  $dT/dx$ . El signo menos en la Ec. 1.4 indica que el flujo siempre va de la fuente caliente a la fría, es decir opuesto en signo al del gradiente térmico. Implícitamente suponemos que no hay pérdidas de calor en la barra por las caras laterales, ni por otros mecanismos.

Esta expresión también puede escribirse como:

$$H = \frac{dQ}{dt} = -\frac{k \cdot A}{l} \cdot (T_c - T_f) = \frac{\phi T}{R_{ter}} \quad (1.5)$$

Siendo  $R_{ter}$  la resistencia térmica de la muestra, magnitud análoga a la resistencia eléctrica.

$$R_{ter} = \frac{l}{k \cdot A} \quad (1.6)$$

La Ecuación 1.5 también resulta útil escribirla en forma diferencial, (Fig. 1.1(b)) para un elemento de barra infinitesimal de longitud  $dx$  como:

$$H = \frac{dQ}{dt} = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1.7)$$

Comúnmente los sensores de flujo de calor son utilizados en distintos procesos como son la manufactura de circuitos integrados, en la industria química, para meteorología y física de suelos así como para la caracterización de materiales entre otros usos. Además es importante destacar que si no existe un gradiente térmico a través del sensor, no hay flujo de calor que

pueda ser medido. Esto es muy importante para mediciones largas en tiempo donde el sensor puede alcanzar el equilibrio térmico.

El sensor de flujo de calor debe tener buen contacto con el flujo a medir para no ocasionar puntos calientes que alteren el gradiente dentro del sensor, es decir, se debe procurar tener una distribución homogénea en el elemento sensor para que éste mida adecuadamente.

### 1.1.3 Definición del efecto fototérmico

El efecto fototérmico es un fenómeno asociado a la radiación electromagnética. Es producido por foto-excitación del material, esto es, que los fotones procedentes de una fuente de luz son absorbidos por una capa superficial de un material de color negro, incrementando así la energía cinética interna, y dando como resultado la producción de energía térmica (calor).

Un ejemplo concreto del efecto fototérmico, conocido como efecto óptico mirage o deflexión fototérmica, es una carretera caliente que algunas veces parece una superficie reflejante, la cual aparenta ser una piscina de agua (Fig. 1.2). La radiación del sol es absorbida por el concreto o asfalto, resultando un calentamiento de la superficie. La superficie caliente transfiere energía al aire sobre la superficie. Un gradiente de temperatura se desarrolla entre el aire cercano a la superficie y la masa de aire superior. Debido a que el aire se expande cuando es calentado, la densidad del aire en la superficie es menor que el que está en las capas superiores. El decremento de densidad resulta en un decremento del índice de refracción. Debido a que la velocidad de la luz es más rápida en un medio con índice de refracción bajo, la luz incidente con un ángulo tangente es refractada hacia arriba. Por tanto, un observador mirando en la superficie con un ángulo tangencial no verá la superficie, pero sí verá venir los rayos del cielo sobre la superficie.

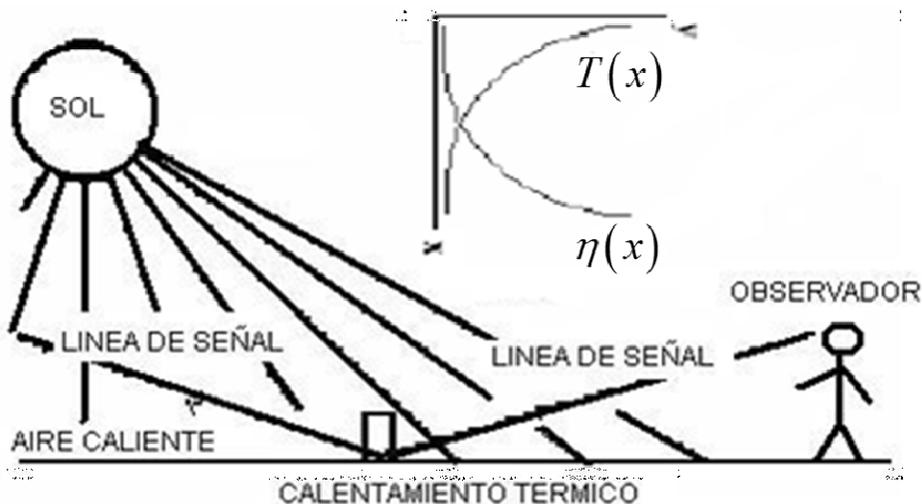


Figura 1.2. Esquema del efecto mirage

El diseño del sensor de flujo de calor basa su funcionamiento en el efecto fototérmico, que provoca la disminución del índice de refracción debido al decremento en la densidad de un medio expuesto a una fuente de calor que le transfiere energía ( $T(x)$ ). Este cambio en índice de refracción ( $n(x)$ ) tiene como consecuencia que la luz desvíe su camino al atravesar dicho material propagándose en la parte en que el índice de refracción tenga mayor valor [13].

## 1.1.4 Deflexión de un haz debido al efecto fototérmico

El sensor de flujo de calor diseñado en este trabajo, inicialmente está basado en esta técnica, específicamente en los primeros experimentos se producirá el efecto fototérmico sobre una película polimérica absorbente con la finalidad de que ésta funcione como la fuente de calor del sistema, posteriormente dicha fuente será sustituida por un elemento sólido que transmitirá calor por el mecanismo de conducción.

Para determinar el ángulo de deflexión  $\theta$  del haz de prueba, éste se modela como un rayo simple de luz con diámetro infinitesimal. La deflexión (en radianes) del rayo propagado a través del medio con pequeños gradientes de índice de refracción perpendiculares a la dirección de propagación  $z$  está dada por [14]:

$$\theta = \int \frac{\nabla n}{n} dz \quad (1.8)$$

Donde:

$$\nabla n = \frac{dn}{dT} \nabla T \quad (1.9)$$

$\frac{dn}{dT}$  es el coeficiente termo-óptico del medio

$n$  es el índice de refracción

$\nabla T$  es el gradiente de temperatura transversal al camino óptico del haz incidente

Por lo que el ángulo de desviación del haz  $\theta$ , debido al efecto fototérmico es:

$$\theta = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \int \nabla T(r,t) ds \quad (1.10)$$

En la última expresión,  $s$  representa el camino óptico del haz y  $T(r,t)$  la función de temperatura de acuerdo con la posición y el tiempo.

## 1.2 Propagación de un haz en una fibra óptica monomodal

Conociendo previamente que el principio de funcionamiento del sensor de flujo de calor consiste en detectar la desviación de un haz (causado por una disminución en el valor de índice de refracción debido a la presencia de un gradiente térmico), que se presenta a su vez como un decremento en la potencia de salida, ahora es necesario enfocarse en la transmisión de la señal. Para la detección de flujo de calor en el sensor presentado en este trabajo, se

# 1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

utiliza fibra óptica monomodal como guía de onda. Por ello se presenta este apartado donde se describe la forma en que se propaga un haz de luz a través de ésta.

El diagrama que muestra la geometría utilizada en la fibra se ve en la Fig. 1.3 en donde es señalado a  $\Phi$  como el radio total de la fibra y  $r$  el radio del núcleo de la fibra.

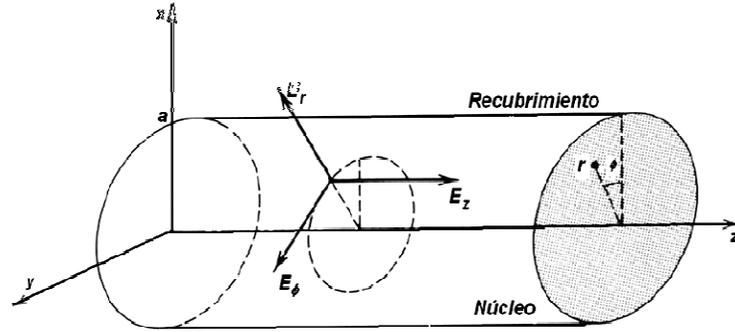


Figura 1.3: Sistema coordenado cilíndrico utilizado en fibra óptica

Para fibras ópticas de contraste bajo en las que  $\frac{n_1}{n_2} \ll 1$ , donde  $n_1$  es el valor de índice de refracción del núcleo de la fibra y  $n_2$  el índice de refracción del revestimiento de la fibra, se tiene una componente de campo transversal predominante lo que permite utilizar el campo del modo guiado como si fuera una cantidad escalar y el coeficiente de transmisión puede obtenerse acoplado sólo las componentes transversales del campo eléctrico en sus modos radiado y guiado. Las ecuaciones de Helmholtz en coordenadas cilíndricas para zona del núcleo de la fibra ( $r < a$ ) y para el sustrato ( $r > a$ ) para una fibra de contraste bajo son:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{\partial U}{r \partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + n_1^2 k_0^2 U = 0 \quad r < a \quad (1.11)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + n_2^2 k_0^2 U = 0 \quad r > a \quad (1.12)$$

donde  $k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda_0$  para una onda plana de frecuencia  $\omega$  y  $U = U(r, \Phi, z)$  es la función de la amplitud compleja que representa los componentes del campo eléctrico o magnético.

Asumiendo una propagación en  $z$  con una constante de propagación  $\beta$  se tiene que:

$$U(r, \phi, z) = u(r) e^{-j\phi} e^{-j\beta z} \quad \text{para } l = 0, \pm 1, \pm 2 \quad (1.13)$$

Tomando como:

## 1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

$$k_r^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (1.14)$$

$$\gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2 \quad (1.15)$$

y sustituyendo estas expresiones en la ecuación de onda se pueden obtener las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} + \left( k_r^2 - \frac{l_2^2}{r^2} \right) u = 0 \quad \text{para } r < a \quad (1.16)$$

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} + \left( \gamma^2 - \frac{l_2^2}{r^2} \right) u = 0 \quad \text{para } r > a \quad (1.17)$$

Con soluciones:

$$u(r) \propto \begin{cases} J_l(k_r r) & r < a \\ K_l(\gamma r) & r > a \end{cases} \quad (1.18)$$

Donde  $J_l$  son las funciones modificadas de Bessel de orden  $l$  y  $K_l$  son las funciones modificadas de Bessel de orden  $l$  en las cuales  $l = 0$  para el modo fundamental.

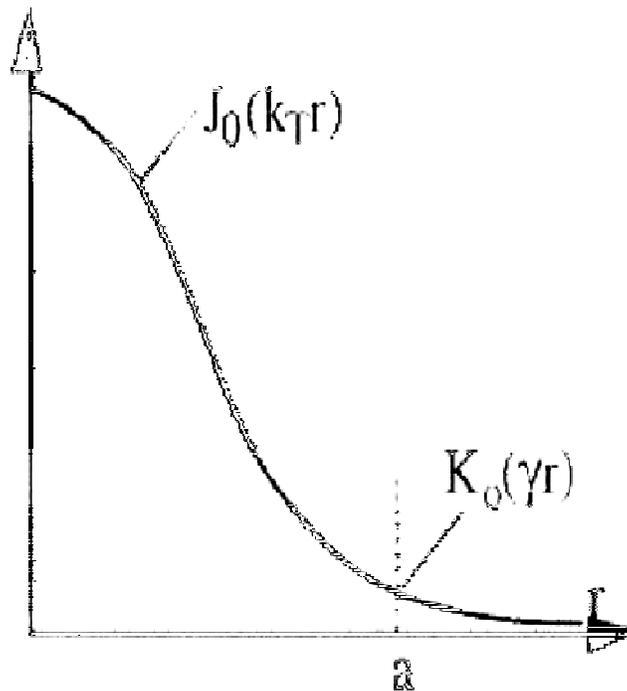


Figura 1.4: Distribución radial del campo para el modo fundamental

## 1.3 Haz gaussiano

Aun cuando no existe una definición formal de haz de luz es común tomar como válida la analogía con un rayo de carácter unidimensional, en la dirección de propagación de la luz. Un haz es más complicado, éste sería un conjunto de rayos los cuales no necesariamente tendrán la misma dirección o sus direcciones varían ligeramente con respecto a un eje de propagación. La idea del conjunto de rayos sirve para describir la propiedad de dimensión transversal que poseen los haces de luz. Otra característica que es imposible describir con los rayos es la fase de las ondas que componen el haz. El tratamiento que permite describir de forma completa las características de un haz es el ondulatorio. Donde el haz se considera una onda que tiene una dirección preferencial de propagación. El caso más conocido de tratamiento de haces son los gaussianos, descritos con las características de divergencia o convergencia, la fase del frente de onda y la dimensión transversal del haz. Es común encontrar este tipo de haces en los sistemas láser y muchos de los haces con una estructura más compleja hacen uso de los haces gaussianos.

El haz gaussiano es la mejor aproximación para la óptica geométrica como para la teoría ondulatoria. El frente de onda gaussiano es plano en la cercanía de la cintura del haz y se vuelve esférico conforme se aleja, sin embargo la energía del haz se encuentra confinada dentro de un ángulo de divergencia. Los parámetros que describen un haz gaussiano, y que dependen de la propagación son el diámetro del haz, el radio de curvatura del frente de onda y las constantes de propagación.

### 1.3.1 Colimación de un haz gaussiano

La finalidad de colimar la luz de una fibra óptica es obtener un tamaño deseado de diámetro del spot. Esta colimación se consigue mediante el uso de lentes de difracción limitada para poder obtener tamaños de spot del orden de micras. La colimación de la luz se logra mediante la colocación de la señal luminosa en el punto focal de las lentes, logrando con esto un haz colimado al otro lado. Se tiene un haz colimado cuando se tienen rayos paralelos de un haz por lo que la energía solo se propaga en una sola dirección.

Es necesario tomar en cuenta ciertas consideraciones sobre la fuente luminosa, puede obtenerse de manera práctica un haz colimado mediante un sistema de dos lentes: una primera lente hace converger todos los rayos en la distancia focal de una segunda lente, de forma que finalmente se transmite un haz de rayos paralelos. Una lente o secuencias de éstas pueden utilizarse para enfocar un haz gaussiano sin que esto afecte su forma (Fig. 1.5).

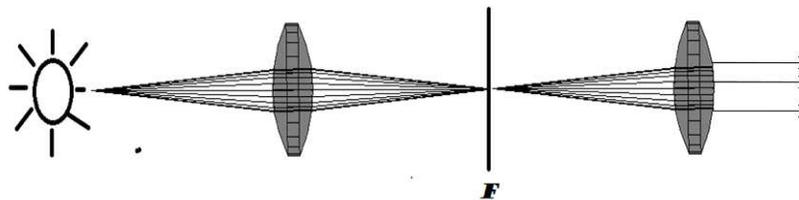


Figura 1.5. Arreglo de un colimador.

La distribución espacial de la luz emitida por un láser, depende de la geometría del resonador y de la forma del material activo utilizado. Para una geometría idealizada (con dos espejos planos paralelos de extensión infinita y con el espacio entre ellos completamente ocupado por el material activo) la salida del láser es una onda plana propagándose a través del eje del resonador.

## 1.4 Sensores de Intensidad

Para finalizar el contenido de este capítulo introduzco la definición de sensor eléctrico, que es un dispositivo que transforma una señal de los diferentes dominios de la energía (mecánica, química, calorífica, magnética, luminosa etc...) al dominio de la energía eléctrica. Esta detección puede llevarse a cabo por diversos medios dependiendo del parámetro que se desea obtener y del tipo de transductor que se utilice en el proceso.

Su clasificación varía de acuerdo con la fuente de energía que utilizan para capturar información sobre un objetivo en sensores activos y sensores pasivos. Los sensores activos, son aquellos que emiten energía sobre el objeto y reciben la señal reflejada por el mismo. Los sensores pasivos, son aquellos que utilizan fuentes externas de energía para obtener información de los objetos. La mayoría de los sensores utilizados para la observación de la tierra son pasivos, estos sensores generalmente trabajan sobre el rango del visible dentro del espectro electromagnético. Generalmente dentro de los sensores pasivos se encuentran los sistemas ópticos.

Los sensores modulados en intensidad son los dispositivos más comunes dentro de la gama de sensores basados en fibra óptica. Estos sensores detectan un cambio en el parámetro medido, específicamente la variación de intensidad proveniente de una fuente de luz dado un desplazamiento angular de la señal [13]. Son frecuentemente utilizados para el control de posición, así como el control de vibración en procesos de maquinado, automatización y en sistemas inteligentes. Como consecuencia de sus cualidades (dimensiones compactas y resistencia del sensor, mediciones no destructivas y sin contacto para un amplio rango de parámetros físicos, bajo costo, implementación sencilla, alta precisión, entre otras...) se tiene un extenso uso de los sensores de fibra óptica modulados en intensidad, por ello la optimización de estos sistemas de sensado son el foco de interés de numerosas investigaciones actuales, intentando principalmente realizar las mediciones con el menor ruido posible. Aunado a lo anterior, la cualidad que vuelve sumamente novedosos a los sistemas de medición con fibra óptica es la ventaja de inmunidad a la interferencia electromagnética que simplifica la conexión entre el sensor y el sistema de detección, lo que resulta de gran importancia para automatización en aplicaciones industriales.

## 1.4.1 Clasificación

Los sensores de intensidad en fibra óptica según su mecanismo de modulación se clasifican en extrínsecos e intrínsecos:

- *Sensores extrínsecos o híbridos:* Son sensores en los que la luz transportada por la fibra óptica se modula en un elemento externo bajo la acción de la magnitud a medir o del fenómeno a detectar. En este tipo de sensores las fibras ópticas sólo sirven como guías de ondas que conectan la fuente, el detector y la zona de medida. Estos dispositivos pueden hacer uso de sistemas ópticos que no sean en fibra óptica; es decir, pueden ser dispositivos híbridos con una parte en fibra óptica y otra de óptica convencional.
- *Sensores intrínsecos o de efecto interno.* Son sensores en los que la magnitud a medir modifica las características ópticas de la fibra, directamente o a través de un recubrimiento. Dichas modificaciones producen variaciones en algún parámetro de la radiación. Por ende, la manipulación mecánica de la fibra conlleva la modulación de la luz.

Particularmente el sensor de flujo de calor propuesto en este trabajo de tesis se clasifica dentro del tipo de sensores extrínsecos o híbridos.

## 1.4.2 Parámetros de funcionamiento

Entendiendo al sensor como un instrumento de medición, es necesario establecer los parámetros de su funcionamiento para su correcta aplicación en procesos de sensado. Dichos parámetros se describen a continuación:

- *Sensibilidad:* Es la razón entre la respuesta en la salida a un estímulo en la entrada.
- *Precisión:* Es la forma con la cual podemos saber que tanta repetibilidad tiene el sensor, es decir, que tanto reproduce las mediciones.
- *Exactitud:* Indica la aproximación entre el valor detectado y el valor verdadero de la señal medida. La obtención de esta característica puede ser encontrada mediante la comparación con un modelo teórico.
- *Rango:* El intervalo de valores en los cuales el instrumento de medición es capaz de operar con precisión y exactitud.
- *Resolución:* Es el menor incremento de la variable bajo medición que puede ser detectado por instrumento.

## 1.5 Sensores de flujo de calor publicados recientemente

Actualmente en la medición de flujo de calor se utilizan termopares y termopilas que miden la temperatura en varios puntos para la obtención indirecta del parámetro deseado. El uso de termopares para el sensado de la temperatura se ve limitado para casos en los que se tiene radiación de interferencia o condiciones inaceptables para el buen estado del instrumento como son temperaturas muy altas; es por esta razón que el sensado de flujo de calor por medio del uso de sensores con fibra óptica se ha extendido.

De esta manera es posible clasificar a los sensores de flujo de calor de acuerdo con su principio de funcionamiento y estos serían: aquellos que usan termopilas para la medición y los que miden la deflexión de un haz basados en sistemas de fibra óptica.

A continuación presento algunas características de trabajos recientes de investigación relacionados con la medición de flujo de calor:

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO PARA MEDICIÓN DE FLUJO DE CALOR APLICANDO CALORIMETRÍA DIRECTA: SENSADO POR FLUJO DE CALOR[7]

Es un dispositivo inalámbrico de medición de flujo de calor que emplea el método de calorimetría directa. Funciona a partir de una termopila creada en configuración de placas paralelas. El aspecto más sobresaliente del proyecto es que presenta una interfaz entre el sensor y la PC, por lo que consta de las etapas de sensado (adquisición de datos), filtrado, conversión analógica digital, programación de un microcontrolador para culminar en la interfaz software –hardware.

- Sensibilidad =  $(7.5 - 11.5) [\mu V \cdot (Wm^{-2})]$
- Rango =  $-180 [^{\circ}C]$  a  $200 [^{\circ}C]$
- Área =  $25 [cm^2]$

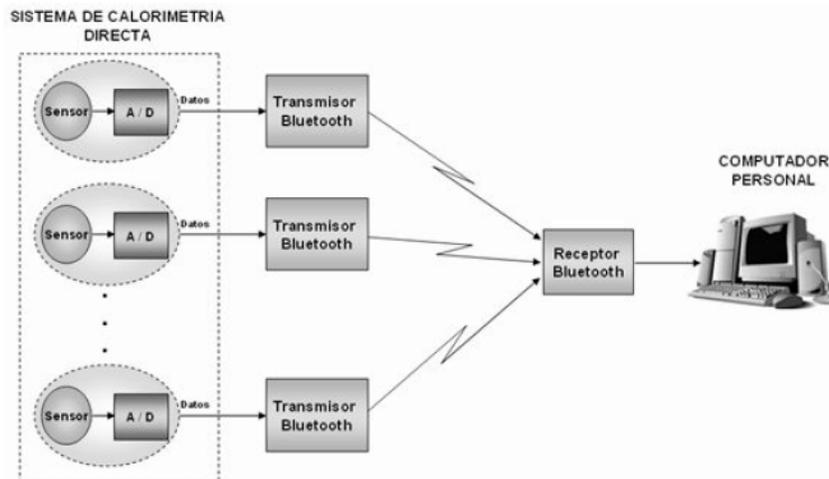


Figura 1.6: Esquema de funcionamiento del sensor de flujo de calor por calorimetría directa

# 1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

## DESIGN AND FABRICATION OF MICRO HEAT FLUX SENSOR[3]

Es un prototipo diseñado para la medición de cantidades pequeñas de flujo de calor en medios convectivos. El flujo de calor que se recibe de una pared dopada de oro es medida dada una diferencia de temperatura de la juntura de un termopar (Ni - Cr). Para aumentar la sensibilidad, los autores plantean que se cumpla la condición de colocar ortogonalmente el sensor de flujo de calor respecto a la dirección del flujo de calor emitido por la pared dopada.

- Sensibilidad =  $(0.1 - 10) [\mu V \cdot (mW/cm^2)]$
- Rango = 20 a 350  $[mW/cm^2]$

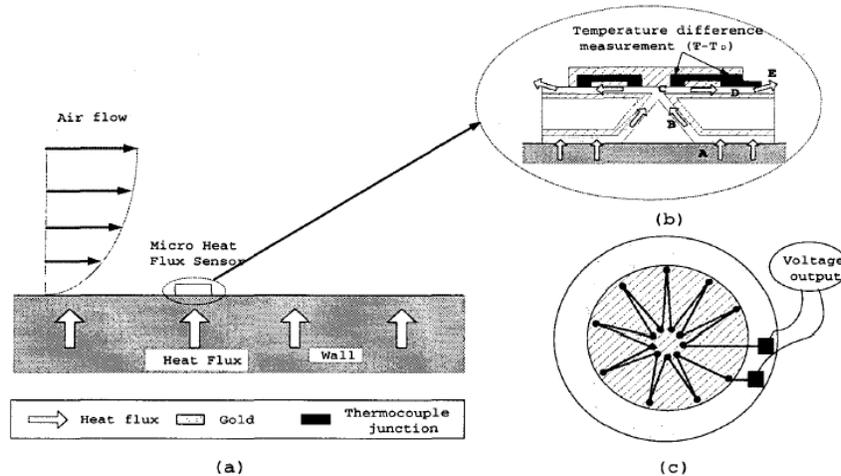


Figura 1.7: Principio de funcionamiento del micro sensor de flujo de calor

## 3x3 HEAT-FLUX SENSOR ARRAY FOR THE THERMAL MEASUREMENT OF IC PACKAGES[8]

El artículo describe un arreglo microelectrónico de sensores de flujo de calor formando 3 columnas y 3 filas, con las que se miden flujos parciales en un sistema. El arreglo de sensores mantiene la estructura de superposición de elementos (fabricados con silicón), lo que hace posible recuperar la señal de salida de únicamente un lado del arreglo. Se utilizan como transductores dos termopares de los cuales su voltaje de salida es proporcional al flujo de calor.

- Sensibilidad =  $165 [\mu V/Wm^{-2}]$
- Área del arreglo =  $25 [mm^2]$

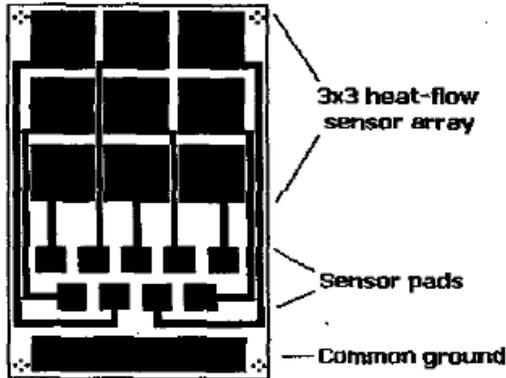


Figura 1.8: Arreglo del sensor de flujo de calor

## FIBER-OPTIC SYSTEM FOR HEAT FLUX MEASUREMENT[19]

Para este trabajo se utilizaron dos tipos distintos de sensores de fibra óptica, uno basado en fibras con rejillas de Bragg y el otro basado en un sistema de fluorescencia.

El sistema basado en la fluorescencia consiste en dos cabezas de prueba conectadas cada una a un fotodetector y a una fuente para poder excitar el sistema con un láser; con esto se recolectó la emisión fluorescente. El tener dos cabezas de prueba hizo posible la detección simultánea en dos puntos. La relación entre el tiempo de vida de la fluorescencia y la temperatura fue calibrada sobre la temperatura del cuarto de prueba hasta 800 °C.

El sistema basado en rejillas de Bragg utilizó dos rejillas dentro de la fibra elaboradas por medio de una máscara con luz ultravioleta. La fibra fue colocada en un tubo de aluminio para que solo fuera afectada por la temperatura y la reflexión fue analizada con un analizador de espectros óptico.

Durante el proceso de medición ambos sistemas obtuvieron respuestas que seguían la misma forma sin ser exactamente iguales. Los problemas en la medición fueron debidos en gran parte por la convección en el tubo de prueba donde se localizaban los sensores.

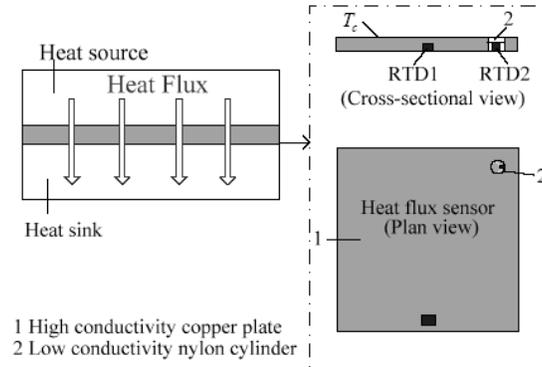
## A NOVEL TEMPERATURE BASED FLAT-PLATE HEAT FLUX SENSOR FOR HIGH ACCURACY MEASUREMENT[15]

Es un sensor en configuración de placas planas usado para un sistema de control PID (Proporcional Integral Derivativo) térmico. Específicamente consiste en una placa alta y una escasamente conductiva de cobre y nylon respectivamente, que se utilizan para establecer una diferencia de temperatura y a partir de termopares medir el flujo de calor. Este par de placas forma un sistema similar a los emparedados, y cada uno contiene dos detectores de de resistencia térmica (Resistance Temperature Detector RTD) que fungen

## 1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

como los transductores del sensor. Además se utiliza la ley de conducción de Fourier para complementar el cálculo mediante el uso de una computadora.

- Sensibilidad =  $0.001-0.01[\text{K}/(\text{W}/\text{m}^2)]$



*Figura 1.9: Esquema de funcionamiento del sensor de flujo de calor basado en un sistema de placas planas*

### SISTEMA EN FIBRA ÓPTICA PARA EL SENSADO DE FLUJO DE CALOR<sup>[18]</sup>

Para este trabajo se utilizaron dos tipos distintos de sensores de fibra óptica, uno basado en fibras con rejillas de Bragg y el otro basado en un sistema de fluorescencia.

El sistema basado en la fluorescencia consiste en dos cabezas de prueba conectadas cada una a un fotodetector y a una fuente para poder excitar el sistema con un láser; con esto se recolectó la emisión fluorescente. El tener dos cabezas de prueba hizo posible la detección simultánea en dos puntos. La relación entre el tiempo de vida de la fluorescencia y la temperatura fue calibrada sobre la temperatura del cuarto de prueba hasta  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El sistema basado en rejillas de Bragg utilizó dos rejillas dentro de la fibra elaboradas por medio de una máscara con luz ultravioleta. La fibra fue colocada en un tubo de aluminio para que solo fuera afectada por la temperatura y la reflexión fue analizada con un analizador de espectros óptico.

Durante el proceso de medición ambos sistemas obtuvieron respuestas que seguían la misma forma sin ser exactamente iguales. Los problemas en la medición fueron debidos en gran parte por la convección en el tubo de prueba donde se localizaban los sensores.

## 1.6 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se analizó el comportamiento termodinámico de un material termo-óptico expuesto a una fuente de calor, con ello se plantea el principio para medir flujo de calor a través de la medición de la deflexión de un haz. Este principio se retomará posteriormente en la descripción del diseño del sensor propuesto en este trabajo de tesis.

Además se explica la forma en la que un haz se propaga a través de una fibra monomodal observando la naturaleza de su perfil gaussiano, mismo que se conserva después que éste se propaga a través de lentes colimadoras.

Finalmente, se expusieron algunos dispositivos utilizados para la medición de flujo de calor, de los que puedo destacar aquellos que basan su principio de funcionamiento en sistemas de fibra óptica, cabe aclarar que éstos aún se encuentran en etapa de investigación, mientras que los que se encuentran disponibles comercialmente basan su funcionamiento en termopares.

## CAPÍTULO 2. SENSOR DE FLUJO DE CALOR CON TRAYECTORIA LINEAL

### 2.1 Características de diseño del Sensor de Flujo de Calor

El presente capítulo muestra las características físicas, la metodología de diseño y las diferentes pruebas de calibración de un sensor de flujo de calor con trayectoria lineal. Se identificarán las principales limitaciones del dispositivo y éstas serán modificadas en el siguiente capítulo buscando desarrollar un diseño de dimensiones más compactas, con disminución del ruido mecánico. Esto con el objetivo de incrementar notablemente la sensibilidad del sistema. Para lograr la caracterización y calibración será necesario analizar las características principales del funcionamiento de ésta configuración del sensor de flujo de calor.

#### 2.1.1 Principio de funcionamiento de un Sensor de Flujo de Calor

El diseño del sensor de flujo de calor basa su funcionamiento en el siguiente principio:

Inicialmente se produce el calentamiento de una de las caras del bloque de acrílico. El calor generado por la diferencia de temperatura entre las caras paralelas del bloque provoca que en este medio exista un gradiente de temperatura  $T(x)$ , que a su vez provoca la expansión molecular en el material termo-óptico y por ende, origina un gradiente de índice de refracción  $\eta(x)$ . Al incidir un haz de luz en este medio con gradiente de índice de refracción se ocasiona una desviación del camino óptico del haz hacia la región menos caliente, es decir, la región con mayor índice de refracción. Éste principio se ilustra en la Fig. 2.1:

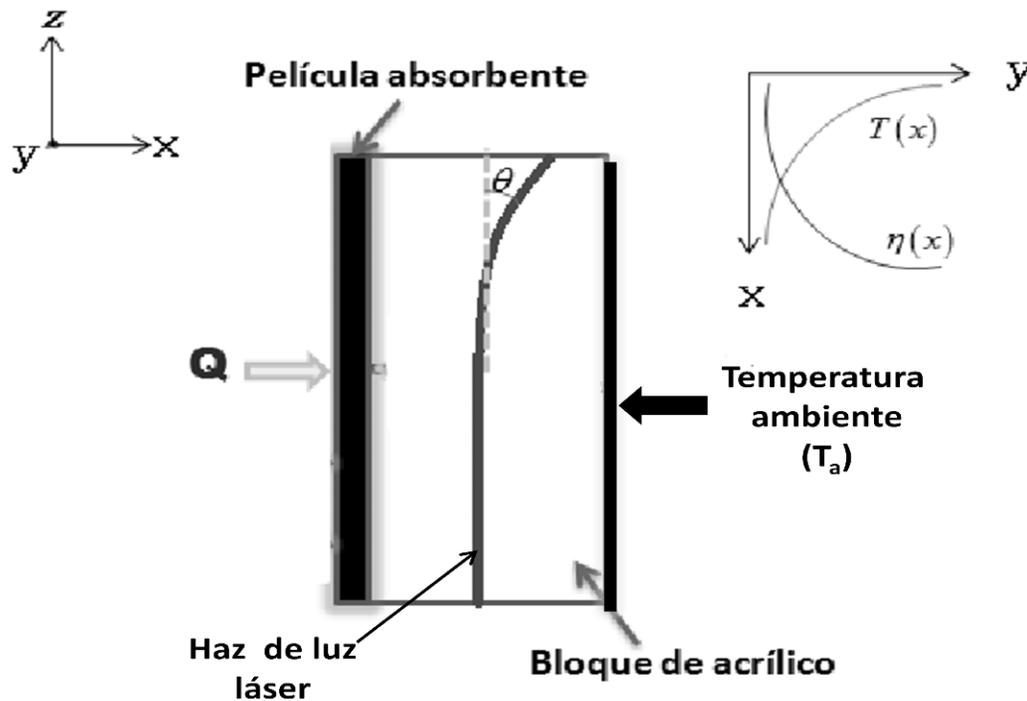


Figura 2.1. Esquema del sensor de flujo de calor.

## 2. SENSOR DE FLUJO DE CALOR CON TRAYECTORIA LINEAL

Producto de la desviación del haz emitido se detecta un cambio de intensidad luminosa que se recibe en una fibra monomodal. Ésta variación en la potencia de salida responde al desacoplamiento entre los perfiles de intensidad del haz de naturaleza gaussiana y la fibra óptica monomodal (Fig. 2.2 y Fig. 2.3), siendo éste el principio de funcionamiento de un sensor de ángulo. Posteriormente se mostrará detalladamente la calibración del sensor de ángulo que intrínsecamente forma parte del sensor de flujo de calor.

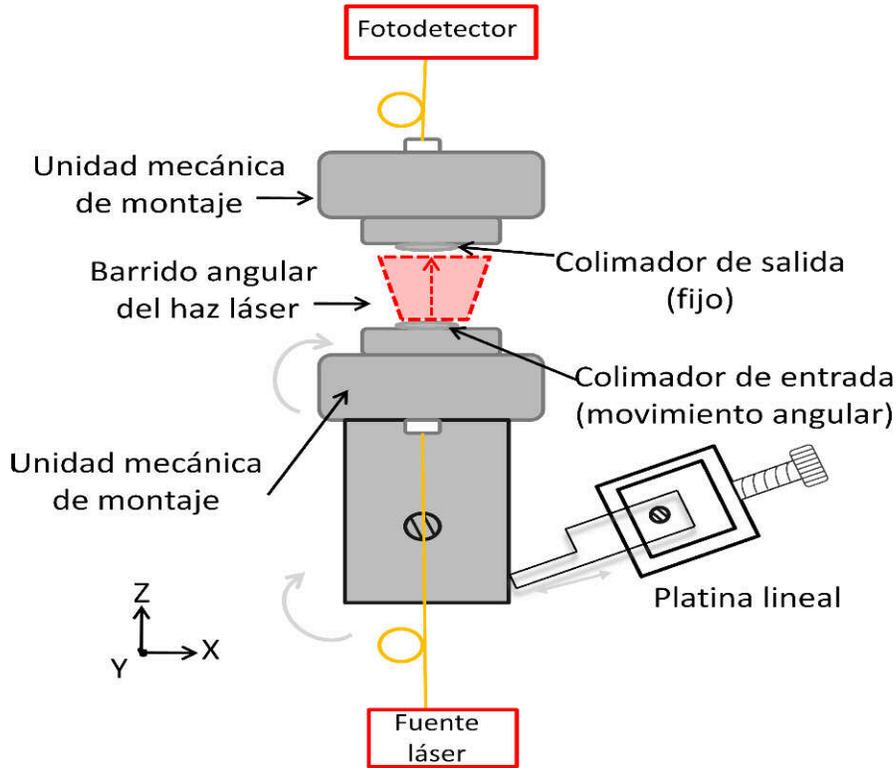


Figura 2.2: Esquema del sensor de ángulo.

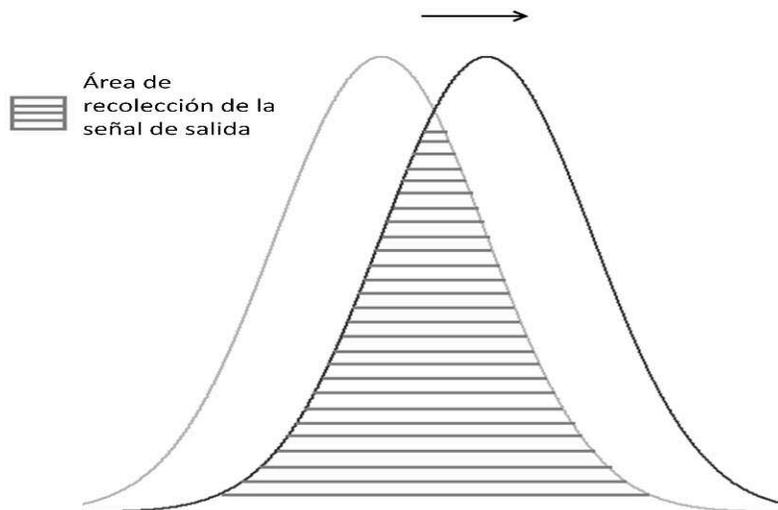


Figura 2.3: Desacoplamiento de los perfiles de intensidad del haz láser y la fibra óptica monomodal.

## 2. SENSOR DE FLUJO DE CALOR CON TRAYECTORIA LINEAL

### 2.1.2 Esquema del sensor de flujo de calor con trayectoria lineal

El montaje experimental del sensor de flujo de calor con trayectoria lineal está conformado por una fuente emisora del haz de luz (láser), que utiliza fibra óptica para la transmisión de la señal y está conectorizada a un sistema de colimación formado por dos lentes colimadoras idénticas, que garantizan un ángulo de divergencia despreciable a lo largo del camino óptico. Situado entre el par de lentes colimadoras se encuentra el material termo-óptico, específicamente un bloque paralelepípedo de acrílico transparente, seleccionado dado que presenta un coeficiente termo-óptico ( $\frac{dn}{dT}$ ) alto y mayor que el vidrio, aunado a que es fácil de manipular y su costo es bajo. El sistema cuenta con un par de placas que alinean y presionan al bloque. Estas placas son manipuladas por medio de 4 tornillos de ajuste situados en los extremos de las mismas, para lograr así la incidencia normal ( $0^\circ$ ) de la cara de entrada del bloque respecto del eje óptico. Aunado a esto, las placas proporcionan mayor estabilidad mecánica en el sistema de sensado.

La fuente de calor del sistema se encuentra en una de las caras laterales del bloque, a la cuál se le adhirió una película polimérica con la finalidad de absorber un amplio rango de longitudes de onda a través del efecto fototérmico. Para llevar a cabo la foto-excitación de la película absorbente, fue necesario colocar una fuente de luz blanca a un costado.

Para la detección de la señal de salida, se colocó un fotodetector que envía los datos adquiridos a una computadora mediante una interfaz. El esquema del montaje experimental descrito se muestra en la Fig. 2.4.

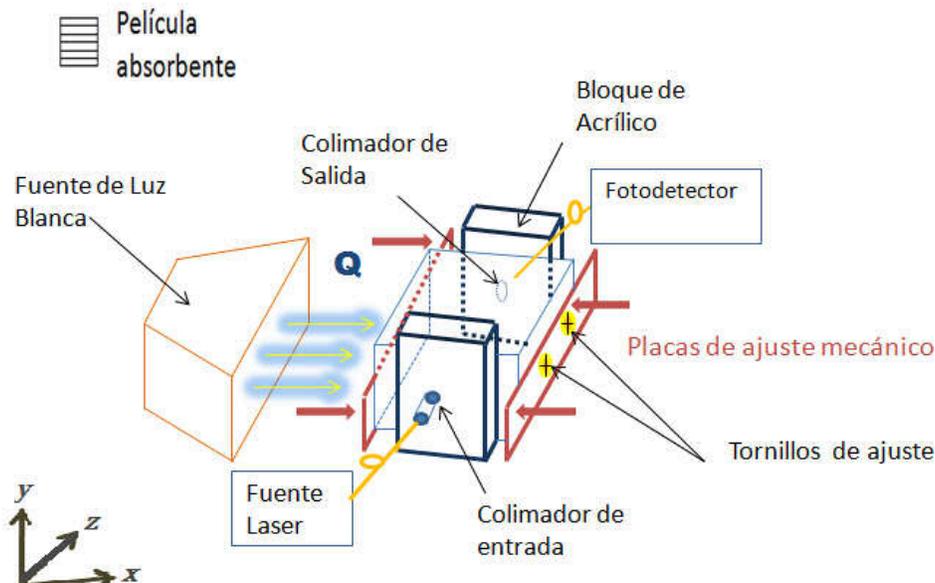


Figura 2.4. Esquema del sensor de flujo de calor con trayectoria lineal.

## 2. SENSOR DE FLUJO DE CALOR CON TRAYECTORIA LINEAL

Particularmente en esta configuración de trayectoria lineal, los elementos implicados en el proceso de medición fueron: una fuente láser del distribuidor Thorlabs modelo S1FC1550, que utiliza un diodo láser ML976H6F de InGaAsP con longitud de onda de 1550 [nm] y potencia máxima de salida de 1.85 [mW]. La guía de onda es una fibra óptica monomodal Corning SMF 28 que transmite hasta el colimador de entrada del montaje de colimación U Bench de Thorlabs, cuya exactitud en el ajuste mecánico proporciona una transmitancia mayor del 90%. Los colimadores utilizados fueron F220FC-C de ThorLabs, los cuales presentan una distancia focal de 11.0[mm]. El diámetro de la cintura del haz es de 0.8 [mm] y su ángulo total de divergencia es 0.118°. De esta manera la señal es transmitida por la fibra y atraviesa el bloque de acrílico para llegar al colimador de salida. Se utilizó una fuente de luz blanca (lámpara que utiliza un foco de 50 W con control para ajuste de intensidad). La potencia entregada fue medida con un medidor de termopila Melles Griot 13PEM001, suministrando de 1.089 a 2.892 [mW/cm<sup>2</sup>].

### ***2.1.3 Resultados Experimentales***

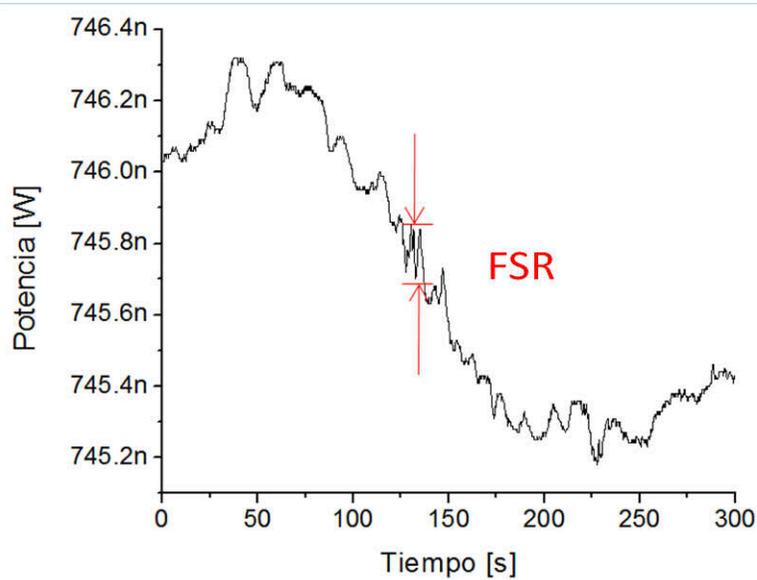
El montaje experimental previamente descrito fue analizado con fines de cuantificar el ruido mecánico, la metodología utilizada se reporta en el apartado siguiente. Posteriormente en los siguientes apartados, se presentan algunas pruebas realizadas para caracterizar y calibrar el sensor de ángulo y el sensor de flujo de calor con trayectoria lineal respectivamente.

#### ***2.1.3.1 Caracterización del Ruido Mecánico***

Debido a la baja estabilidad mecánica en el prototipo inicial [5], aunado al considerable ruido mecánico (presentado por consecuencia), y de la gran dificultad para alinear perpendicularmente el bloque de acrílico respecto de los colimadores (buscando obtener la menor pérdida de potencia por reflexión), fue necesario diseñar un mecanismo de sujeción del bloque capaz de atenuar estos efectos negativos en el diseño. Este mecanismo consiste en un par de placas que presionan al bloque de acrílico de manera perpendicular al eje óptico del haz, como ya se había mencionado anteriormente. Con ellas se aplica una mejor repartición de la fuerza aplicada al bloque, propiciando que éste no se dañe como ocurría anteriormente, dado que la fuerza no se aplicaba a través de superficies de contacto, si no que únicamente se ejercía en puntos específicos por medio de tornillos de ajuste.

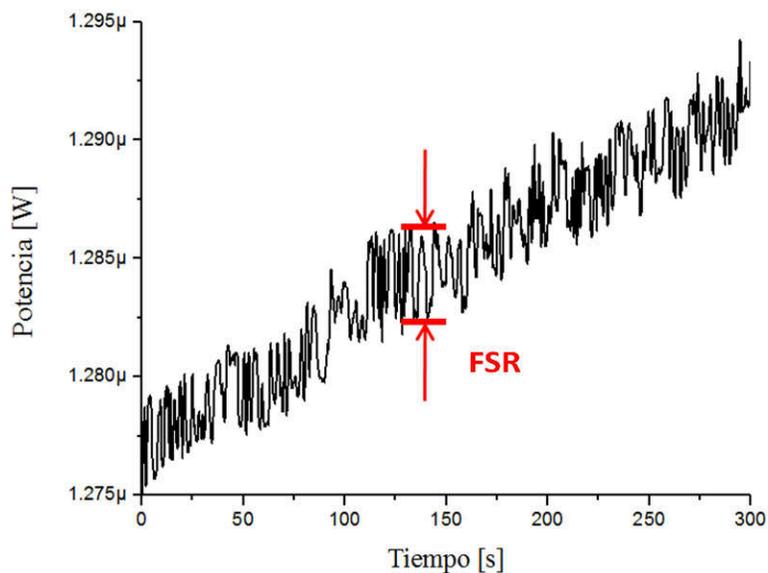
Para llevar a cabo esta prueba de medición de ruido mecánico, se colocó el bloque de acrílico en el soporte U Bench, presionando a éste con las placas antes descritas. Se predeterminó un valor inicial de potencia de la fuente láser, y se monitoreó la señal de salida durante 300 segundos para calcular la relación de señal a ruido(FSR). Este experimento se desarrolló con el sistema de sensado en absoluto reposo y aplicando una presión máxima en los tornillos de las placas de sujeción del bloque. La Fig. 2.5 corresponde a los valores de la medición en el fotodetector con una tasa de 7 muestras por segundo.

## 2. SENSOR DE FLUJO DE CALOR CON TRAYECTORIA LINEAL



*Figura 2.5. Medición de ruido mecánico en condiciones de reposo y presión máxima aplicada a las placas de ajuste mecánico.*

El FSR lo calculé utilizando los resultados de la Fig. 2.5. La señal presenta un valor de 746[nW], mientras que el ruido oscila en un valor aproximado de 0.2[nW]. El cociente entre los datos anteriores resulta aproximadamente 3730, siendo este el valor FSR. Anteriormente en el prototipo propuesto en [5], se obtuvo un valor FSR de aproximadamente 250. Esto representa una mejora de 15 veces el valor de esta relación como consecuencia directa a la implementación de las placas de ajuste mecánico. En la fig. 2.6 se presenta la prueba de estabilidad mecánica sin utilizar las placas de ajuste. Esta medición se realizó bajo las mismas condiciones de reposo, utilizando el sistema de colimación U Bench y monitoreando con el mismo bloque de acrílico.



*Figura 2.6. Medición de ruido mecánico en condiciones de reposo sin las placas de ajuste mecánico*

## 2. SENSOR DE FLUJO DE CALOR CON TRAYECTORIA LINEAL

Se puede apreciar en la Fig. 2.6 que la señal es de  $1.3 [\mu\text{W}]$ , y el ruido se presenta en un valor de  $5[\text{nW}]$  aproximadamente. Resultando el FSR de 250.

De estas dos mediciones se puede constatar que la presencia de las placas de ajuste mecánico tienen un efecto positivo para el sistema de sensado, ya que el FSR se incrementa 15 veces aproximadamente.

### *2.1.3.2 Sensor de Ángulo*

Al inicio de este capítulo se menciona que la medición de la deflexión fototérmica se realiza utilizando un sensor de ángulo, que está compuesto por dos lentes colimadoras, idénticas, conectorizadas a una fibra óptica monomodal y cuyos ejes ópticos están alineados. Es de trascendental importancia destacar que el modo fundamental de la fibra está representado por una forma gaussiana, misma que se conservará al atravesar la lente de los colimadores, teniendo además un frente de onda plano. (Ver apartado 1.3.1)

Con la finalidad de obtener niveles de referencia en el arreglo del sensor de flujo de calor, se calibró el sensor de ángulo en fibra óptica de manera independiente al sensor de flujo de calor. Para esto se caracterizó el cambio en potencia en el fotodetector proveniente del cambio de intensidad recibida debido a la diferencia del ángulo de incidencia de un haz de luz entre dos colimadores. El primer elemento en el arreglo del sensor de ángulo es la fuente láser de  $1550[\text{nm}]$  que suministra la señal al sistema y está conectorizado a una fibra óptica monomodal que llega al colimador de entrada.

Tomando el eje Z como eje de propagación, el plano XZ como plano horizontal y el plano YZ como plano vertical. Se utilizó una platina giratoria graduada con resolución de un minuto de arco que permite el movimiento en el plano XZ. A esta platina se encuentra unida una barra de aluminio desplazada por una platina lineal que se comporta como palanca de giro, es decir, apoyando la fuerza en un punto de la placa que sostiene al colimador de entrada lo hace girar finamente en el plano XZ obteniendo la resolución de un segundo de arco en un rango de aproximadamente  $25 [\text{seg-arc}]$ .

El colimador de salida está montado en una placa sujeta a otra platina de desplazamiento a lo largo del plano YZ. Finalmente, el haz viaja del colimador de salida al fotodetector marca Newport modelo 1930C por medio de fibra óptica.

## 2. SENSOR DE FLUJO DE CALOR CON TRAYECTORIA LINEAL

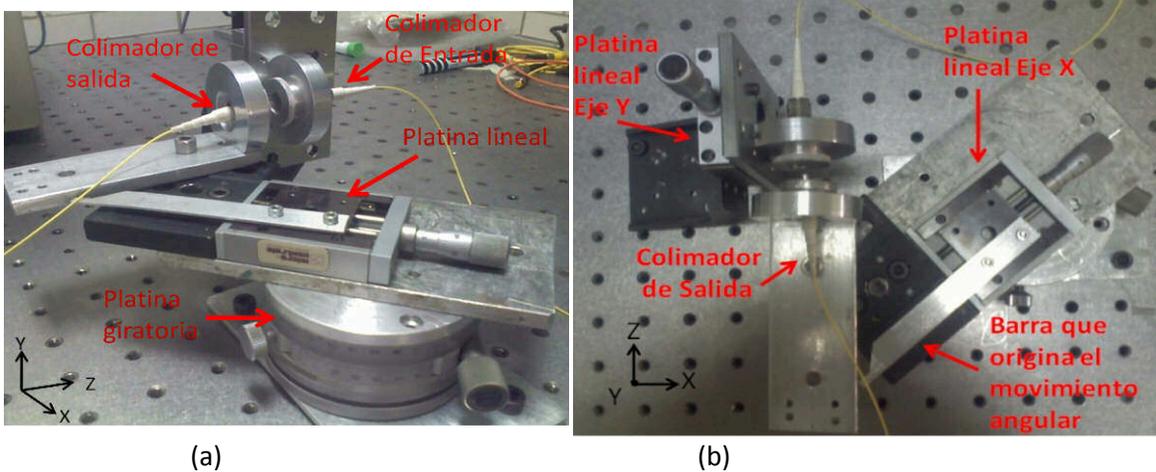


Figura 2.7. Imágenes del montaje experimental de caracterización del sensor de ángulo. (a) Vista lateral del sistema de medición. (b) Vista superior del sistema de medición.

La potencia medida a la salida para el sensor de ángulo puede ser calculada a través del área de recubrimiento de la intersección de las dos curvas gaussianas correspondientes a los perfiles del modo fundamental en dos dimensiones (X-Y) que corresponden al colimador de entrada y de salida. Es necesario indicar que estos perfiles de intensidad están acotados por la circunferencia del área del colimador. Bajo este esquema una deflexión del haz del primer colimador se traducirá en un corrimiento lateral de la imagen proyectada en el plano imagen de la lente del segundo colimador, tal como lo ilustra la Fig. 2.8:

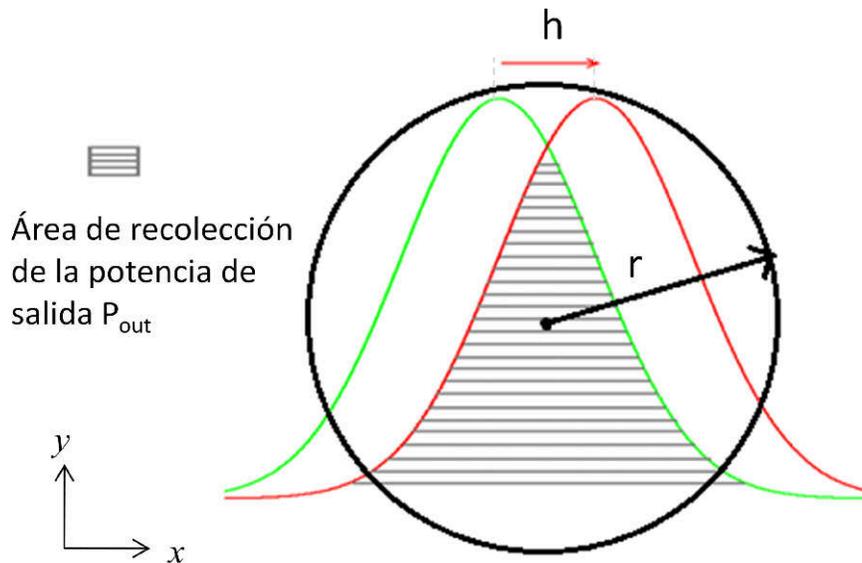


Figura 2.8. Esquema del área de recubrimiento de la intersección de los perfiles gaussianos, desplazados una distancia  $h$ , y acotados por el área del colimador de radio  $r$ .

La expresión para la potencia de salida ( $P_{out}$ ), considerando que el haz gaussiano del colimador de salida se desplace un corrimiento lineal  $h$  con respecto al centro del perfil de

## 2. SENSOR DE FLUJO DE CALOR CON TRAYECTORIA LINEAL

intensidad del colimador de entrada (como consecuencia de la foto-deflexión), como se muestra en la Fig. 2.8, está en función de la intensidad del haz y se calcula a través de la integral de recubrimiento del haz gaussiano en dos dimensiones (X-Y), acotada por el área de la circunferencia del colimador, se expresa en la siguiente expresión:

$$P_{out} = \iint_A I(x, y) dx dy \quad (2.1)$$

Desarrollando la integral queda de la forma:

$$P_{out} = \int_{-r}^r \int_{-\sqrt{r^2-x^2}}^{\sqrt{r^2-x^2}} I_0 e^{-\frac{(x-h)^2+y^2}{\omega_l^2}} dx dy \quad (2.2)$$

Donde  $\omega_l$  es el diámetro del campo eléctrico para el modo fundamental,  $r$  es el radio del núcleo de la fibra  $I_0$  es la intensidad del haz gaussiano.

Dado que la función es constante en el eje  $Y$  (debido a que no presenta corrimiento en esta coordenada por que el calor solo es aplicado en  $X$ ), además de que ésta es simétrica respecto al eje  $x$ , los límites de integración se pueden reescribir de la siguiente manera:

$$P_{out} = 2 \int_0^r \int_{-\sqrt{r^2-x^2}}^{\sqrt{r^2-x^2}} I_0 e^{-\frac{(x-h)^2+y^2}{\omega_l^2}} dy dx \quad (2.3)$$

$$P_{out} = 2I_0 \int_0^r \int_{-\sqrt{r^2-x^2}}^{\sqrt{r^2-x^2}} e^{-\frac{(x-h)^2+y^2}{\omega_l^2}} dy dx \quad (2.4)$$

Aplicando un cambio de variable  $t = \frac{y}{\omega}$ ;  $dy = \omega dt$ ;  $y^2 = t^2 \omega^2$ , y definiendo la función error complementario:

$$erf(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-u^2} du \quad (2.5)$$

Podemos reescribir la Ec. 2.4 como:

$$\int_{-\sqrt{r^2-x^2}}^{\sqrt{r^2-x^2}} e^{-\frac{(x-h)^2+y^2}{\omega_l^2}} dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \int_{-\sqrt{r^2-x^2}}^{\sqrt{r^2-x^2}} \frac{2\omega_l}{\sqrt{\pi}} e^{-t^2} dt = \frac{\omega_l \sqrt{\pi}}{2} erf \sqrt{r^2-x^2} \quad (2.6)$$

## 2. SENSOR DE FLUJO DE CALOR CON TRAYECTORIA LINEAL

$$P_{out} = 2I_o \int_{-\sqrt{r^2-x^2}}^{\sqrt{r^2-x^2}} e^{-\frac{(x-h)^2}{\omega_l^2}} \left( \frac{\omega_l \sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erf} \sqrt{r^2-x^2} \right) dx \quad (2.7)$$

Finalmente reduciendo y reacomodando términos, la expresión que se utiliza para el cálculo de la respuesta del sensor de ángulo (potencia de salida) está dada por:

$$P_{out} = I_o \omega_l \sqrt{\pi} \int_{-\sqrt{r^2-x^2}}^{\sqrt{r^2-x^2}} e^{-\frac{(x-h)^2}{\omega_l^2}} \operatorname{erf} \sqrt{r^2-x^2} dx \quad (2.8)$$

Por otra parte, para determinar el diámetro  $\omega_l$  del haz gaussiano del modo fundamental de una fibra monomodal Corning SMF 28 con un diámetro del campo eléctrico  $\omega_e$ , se utiliza la siguiente expresión:

$$\omega_l = \frac{\omega_e}{\sqrt{2}} = \frac{10[\mu m]}{\sqrt{2}} = 7.07[\mu m] \quad (2.9)$$

Recordando que el haz gaussiano conserva su forma después de pasar por una lente delgada, la Figura 2.9 muestra como la imagen se proyecta a una distancia focal debido a que se trata de un haz colimado:

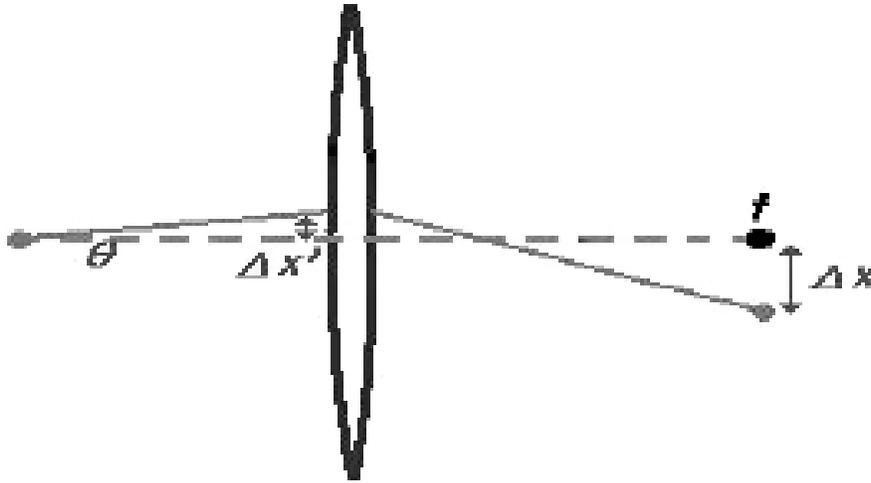


Figura 2.9. Desplazamiento lineal en el plano focal debido a un cambio de ángulo

De la figura 2.9 es posible obtener el ángulo que provoca los desplazamientos mediante la expresión:

$$\Delta x = \theta * f \quad (2.10)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo que se desplaza el haz,  $f=4.5[\mu m]$  es la distancia focal y  $\Delta x$  es el desplazamiento en el núcleo de la fibra óptica.

## 2. SENSOR DE FLUJO DE CALOR CON TRAYECTORIA LINEAL

La evaluación numérica de la Ec. 2.8, que representa la respuesta del sensor de ángulo, se realiza por medio de una programación en Matlab que corresponde al apéndice A de este trabajo de tesis. Con la ayuda de esta herramienta de programación, será posible en el siguiente apartado comparar los resultados experimentales con la curva teórica en la caracterización del sensor de ángulo.

### 2.1.3.2.1 Caracterización del Sensor de Ángulo

El procedimiento para llevar a cabo la caracterización del sensor de ángulo inició alineando perfectamente los dos colimadores entre sí, respecto del eje de propagación del haz registrando un máximo valor de potencia de salida. Posteriormente se desplazó de manera angular 1 [seg-arc] el colimador de entrada manteniendo fijo el de salida. De esta manera se ocasionaba un decremento de la potencia hasta que la señal monitoreada igualara los valores de ruido. Es importante mencionar que el barrido angular se efectuó en 2 direcciones, por ello se obtuvieron resultados positivos y negativos en el eje de las abscisas, presentando en 0[seg-arc] el máximo valor de potencia de salida. La Fig. 2.10 corresponde a la grafica de los datos obtenidos.

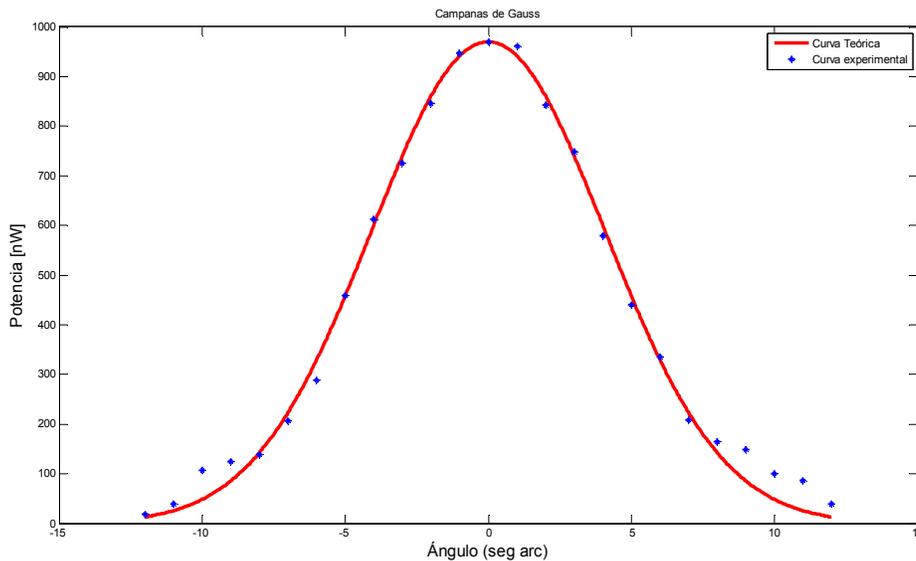


Figura 2.10. Respuesta del sensor de ángulo. Comparación de la curva experimental con la teórica.

Satisfactoriamente se aprecia que la resolución del sensor de ángulo fue incrementada 60 veces respecto del prototipo inicial, es decir ahora se puede medir en incrementos de 1[seg arc]. Por otro lado, este sistema es más estable ante el ruido mecánico, aunado a que el control del barrido angular es más sencillo y exacto.

Finalmente, se realiza una linealización de la respuesta del sensor de ángulo por medio de un cambio de variable(se aplica un logaritmo a la expresión exponencial para obtener un

## 2. SENSOR DE FLUJO DE CALOR CON TRAYECTORIA LINEAL

modelo lineal). La Fig. 2.11 corresponde esta recta de aproximación lineal de la respuesta del sensor de ángulo, a partir de ella se obtiene una pendiente de 114 [(seg-arc)/nW] que corresponde a la sensibilidad del dispositivo. Además el sensor de ángulo presenta una resolución es 1 [seg-arc] y el rango en el que opera es de 24 [seg-arc].

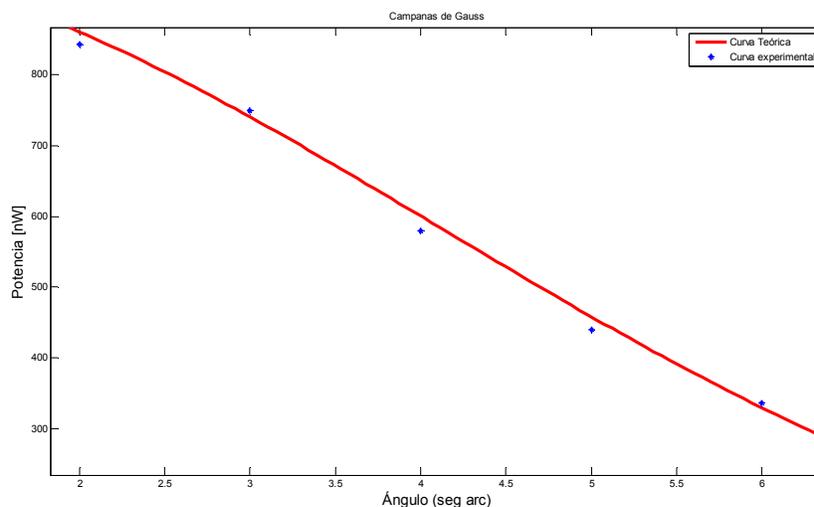


Figura 2.11. Recta de linealización de los valores experimentales de la curva de respuesta del sensor de ángulo

Basado en la recta de linealización de los valores experimentales de la respuesta del sensor de ángulo, obtengo una sensibilidad de 14[nW/seg-arc].

### 2.1.3.3 Medición de flujo de calor con trayectoria lineal

Esta prueba consistió en medir la potencia de salida aplicando flujo de calor de 2.214[mW/cm<sup>2</sup>]. La medición daba inicio colocando el bloque de acrílico a una distancia de 45[mm] de la lámpara, posteriormente se ajustaba la posición del bloque dentro del U-bench para obtener el máximo de transmitancia de la señal. La posición del bloque de acrílico era ajustada en el plano XZ mediante el ajuste de los cuatro tornillos unidos a las superficies laterales de la montura, por lo que se buscaba una posición totalmente ortogonal entre el haz incidente y la cara del bloque de acrílico. Posteriormente se iniciaba las pruebas de flujo de calor, para ello la fuente de calor fue encendida a los 150[s] y apagada a los 560[s]. Cada medición finalizaba a los 1200[s], no obstante se dejó un periodo de recuperación para que la señal regresara al nivel del punto de referencia para poder realizar la siguiente medición.

Posteriormente, realicé una prueba de repetibilidad con 5 monitoreos de la respuesta del sensor de flujo de calor en trayectoria lineal, buscando obtener la misma respuesta ante estímulo inicial bajo las mismas condiciones.

## 2. SENSOR DE FLUJO DE CALOR CON TRAYECTORIA LINEAL

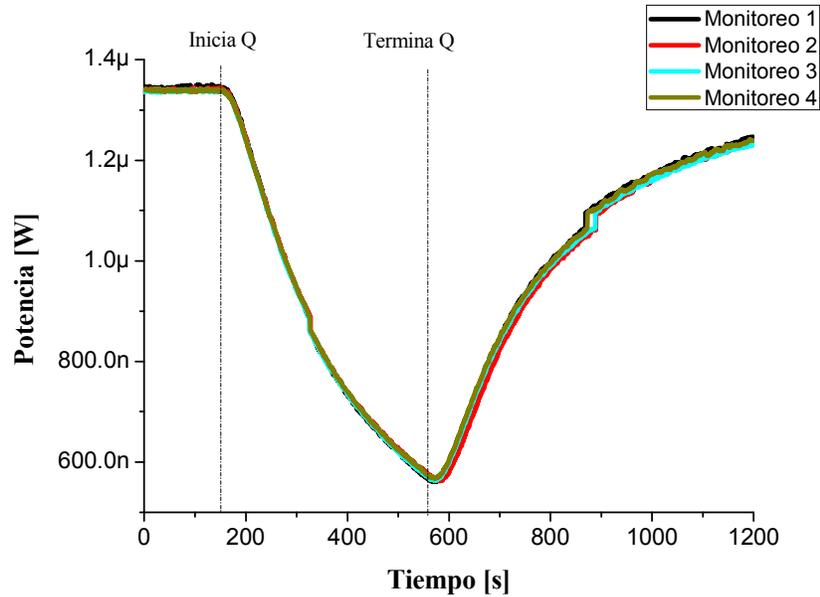


Figura 2.12: Respuesta del sensor de flujo de calor a un pulso de calor  $Q=2.214[mW/cm^2]$

La Fig. 2.12 anterior describe la respuesta del sensor de flujo de calor en trayectoria lineal cuando se le aplica un pulso de  $Q=2.214[mW/cm^2]$ . Inicialmente se determinó esperar 150[s] antes de encender la fuente de luz, para monitorear la estabilidad de la fuente láser. Posteriormente, cuando se enciende la lámpara de luz blanca que ocasiona la deflexión del haz dado el gradiente de temperatura ocasionado por el efecto fototérmico, la potencia de salida sufre un decremento en su valor, incluso después de los 560[s](cuando se apaga la fuente de luz), debido a la inercia térmica que se presenta en el bloque de acrílico. Por último, cuando el bloque cede calor a su entorno, el haz comienza a corregir el ángulo de desviación y ocasiona por ende el aumento gradual del valor de la potencia de salida.

### 2.1.3.4 Calibración del sensor de flujo de calor con trayectoria lineal

Para calibrar el sensor se efectuó nuevamente el procedimiento de la medición anterior, ahora aplicando diferentes valores de flujo de calor, es decir, en la prueba anterior se aplica un flujo de calor constante de  $2.214[mW/cm^2]$  y en ésta calibración se aplican flujos de calor en el rango de  $2.446-1.089[mW/cm^2]$ . Cabe mencionar que la fuente de luz que foto-excita la película absorbente, fue encendida a los 10[s] después de iniciar la adquisición de datos y concluía a los 420[s], de esta manera se conserva el intervalo de tiempo en el que se suministra calor al sistema. El tiempo reducido corresponde a la inmediata estabilidad de la fuente láser. También para estas mediciones se respetó el tiempo de recuperación de la señal antes de iniciar nuevamente con el monitoreo. La Fig. 2.13 presenta las curvas de respuesta de esta prueba.

## 2. SENSOR DE FLUJO DE CALOR CON TRAYECTORIA LINEAL

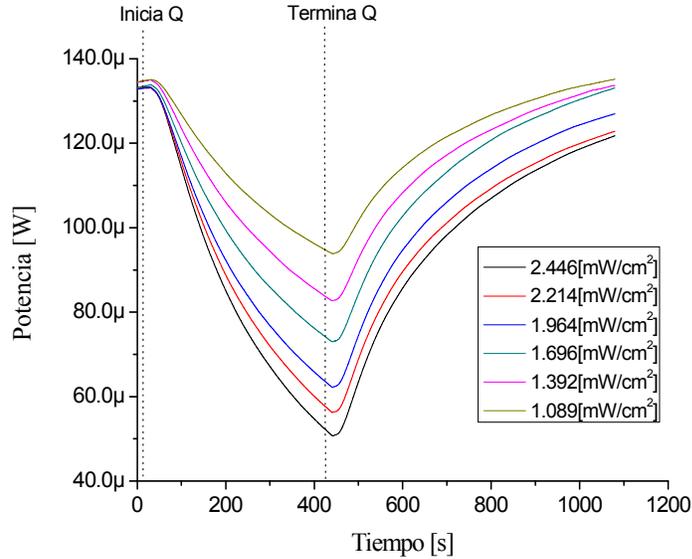


Figura 2.13: Curva de respuesta para diferentes valores de flujo de calor aplicados al sistema.

De esta figura se aprecia que el flujo de calor aplicado es inversamente proporcional a la potencia de salida, esto significa que el valor de la potencia decrece con mayor rapidez cuando se aplica un flujo de calor mayor.

Con el objetivo de graficar una curva de calibración del sensor de flujo de calor con trayectoria lineal, determiné el intervalo de tiempo de la prueba para el cuál, la pendiente adquiere un valor máximo para los diferentes niveles de flujo de calor aplicado. Este intervalo se estableció de los 60[s] a los 180[s] del experimento.

En la figura 2.14 se grafica la curva de calibración, debido a que conozco el flujo de calor aplicado en cada curva, que corresponde a una determinada variación de potencia en el intervalo de tiempo antes establecido:

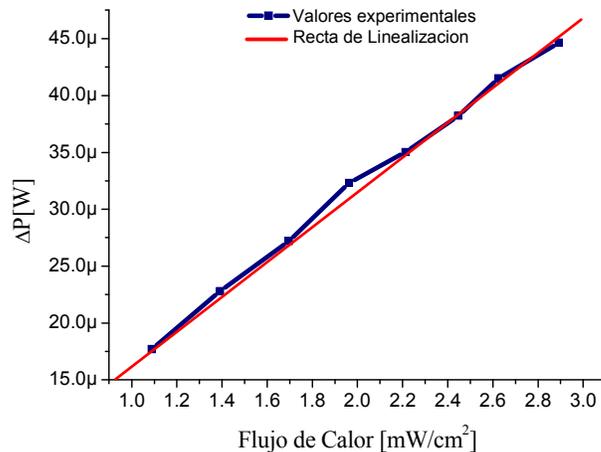


Figura 2.14. Recta de calibración del sensor de flujo de calor.

## 2. SENSOR DE FLUJO DE CALOR CON TRAYECTORIA LINEAL

Finalmente de los resultados experimentales del Sensor de Flujo de Calor para un rango de 1.089 - 2.892 [(mW)/cm<sup>2</sup>], se obtiene una sensibilidad de 15.495[ $\mu$ W/(mW/cm<sup>2</sup>)] (pendiente de la recta de calibración) y una resolución de 0.3[(mW)/cm<sup>2</sup>].

### ***2.2 Limitaciones del Sensor de Flujo de Calor***

Gran importancia recae en este apartado dentro del Capítulo 2, debido a que una vez caracterizado y calibrado el sensor de flujo de calor es posible determinar sus limitaciones experimentales que serán el enfoque central de la optimización del sistema, y basado en ellas se diseñará un sensor de flujo de calor con mayor sensibilidad y en general, más eficiente, que se describirá el capítulo 3.

Por otra parte, la sensibilidad fue mejorada respecto a trabajos previos[5] y sería posible incrementarla proporcionalmente si el camino óptico se prolongara notablemente sin perder de vista uno de los focos centrales del proyecto, que es reducir las dimensiones del sensor. Para ello será necesario diseñar un nuevo prototipo donde el haz recorridos múltiples dentro del área del bloque de acrílico a través de la reflexión de éste en las paredes de entrada y salida del bloque.

### **2.3 Conclusiones del capítulo**

En el presente capítulo se mejoró y caracterizó un nuevo sensor de flujo de calor en trayectoria lineal que presenta una mayor estabilidad al ruido mecánico, obteniendo un factor señal a ruido FSR=3730. Anteriormente en el prototipo inicial[5], se alcanzó un valor FSR=250, lo que representa una mejora de 15 veces el valor de esta relación, y esto se debe a la implementación de las placas de ajuste mecánico.

También se caracterizó un sensor de ángulo mejorando 6000% la resolución respecto del prototipo anterior[5], es decir, anteriormente el sistema era capaz de detectar variaciones de potencia en incrementos del orden de un minuto de arco, mientras que en el actual diseño, el sensor alcanzó una resolución de un segundo de arco. En cuanto a la sensibilidad de este dispositivo se obtuvo un valor de 140[nW/seg-arc] en un rango de 24[seg-arc] y una resolución de 1[seg-arc].

El sensor de flujo de calor con trayectoria lineal propuesto en éste capítulo, opera en un rango de 1.089 a 2.892 [mW/cm<sup>2</sup>], con una sensibilidad de 15.495[ $\mu$ W/(mW/cm<sup>2</sup>)] y una resolución de 0.3[mW/cm<sup>2</sup>]. El porcentaje de variación de potencia que presenta en el intervalo de tiempo de la pendiente máxima es del 11%. Este último valor porcentual es de suma importancia en el proyecto, ya que posteriormente se utilizará como referencia para determinar la magnitud de la optimización en cuanto a la sensibilidad que presentará la configuración final del sensor.

## 2. SENSOR DE FLUJO DE CALOR CON TRAYECTORIA LINEAL

Finalmente concluyo en que existe una posibilidad de optimizar el desempeño de este sensor implementando una configuración de múltiples reflexiones internas en el bloque de acrílico utilizando una película reflejante depositada en ambas caras del bloque. Esto produciría un incremento considerable de la sensibilidad del sensor de forma proporcional a la distancia recorrida por el haz incidente. Además sería viable la reducción en las dimensiones del bloque, lo cual culminaría con un diseño más compacto, de sensibilidad superior y por ende más rápido.

**CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL SENSOR DE FLUJO DE CALOR EN CONFIGURACIÓN DE MÚLTIPLES RELEXIONES**

**3.1 Características del sensor en configuración de reflexión múltiple**

En este capítulo se presenta una nueva configuración en el diseño del sensor de flujo de calor, en el cual se incrementa la sensibilidad y se reducen las dimensiones físicas del sistema. Para ello, fueron modificadas las limitaciones del prototipo del capítulo anterior, y se dio lugar a una configuración en donde el haz incidente realiza reflexiones múltiples dentro del bloque de acrílico. Esto nos condujo a prolongar el camino óptico recorrido por el haz en un espacio menor, dando como resultado el incremento de la sensibilidad. Además se muestra la calibración del sensor de flujo de calor en esta nueva configuración y finalmente se presenta un ejemplo en la medición de tejido biológico (muestra hepática de aviar).

**3.1.1 Esquema de la configuración de reflexiones múltiples**

La característica fundamental del sensor de flujo de calor en configuración de múltiples reflexiones se reduce a modificar el ángulo de entrada del haz incidente, posteriormente lograr que éste se refleje en las 2 superficies paralelas del bloque de acrílico (plano XY) las cuales deben estar metalizadas para alcanzar la máxima reflexión (Fig. 3.1). Será necesario que se efectúen varias iteraciones de este efecto con el fin de alcanzar la máxima distancia de la trayectoria del haz, y de esta manera aumentar la sensibilidad del dispositivo de manera proporcional en que se incrementa la distancia recorrida por el láser con respecto al diseño de trayectoria lineal.

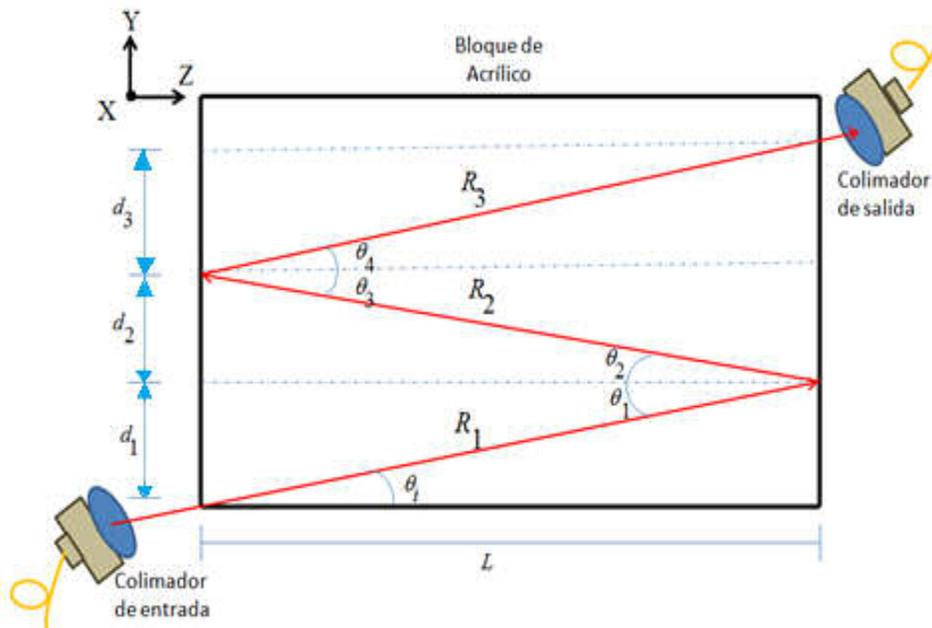


Figura 3.1 Esquema de la geometría que describe el recorrido del haz de luz en el sensor de flujo de calor en configuración de múltiples reflexiones.

### 3. CONFIGURACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES

Para explicar este fenómeno de reflexión, es necesario citar la ley de Snell: "Cuando un haz de luz incide sobre la superficie que separa dos medios, en los cuales la luz se propaga con diferentes velocidades, parte de la misma se transmite y parte se refleja, como se indica esquemáticamente en la Fig. 3.1. Para un medio cualquiera, el índice de refracción  $\eta$  se define como:

$$\eta = \frac{c}{v} \quad (3.1)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $v$  la velocidad de la luz en ese medio[9]."

Finalmente la Ley de Snell se expresa de la siguiente forma:

$$\eta_1 \sin \theta_i = \eta_2 \sin \theta_t \quad (3.2)$$

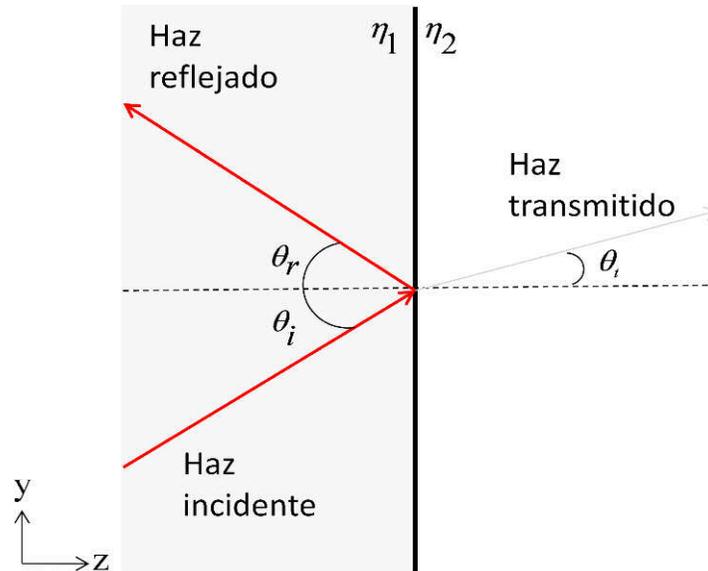


Figura 3.2 Esquema de la ley de Snell.

Retomando la Fig. 3.1 y considerando la ley de Snell, se logra apreciar que el ángulo incidente  $\theta_i$  conservará su valor en las subsiguientes reflexiones, debido a que la recta normal (lineal punteada de la Fig. 3.1) siempre conservará su posición perpendicular a las caras paralelas correspondientes al plano  $XY$  del bloque de acrílico, esto es:

$$\theta_i = \theta_1 = \theta_2 \dots = \theta_m \quad (3.3)$$

Donde:  $m$  es el número de reflexiones internas.

Cumpléndose entonces para la primera reflexión:

$$R_1 = \frac{L}{\cos(\theta_i)} \quad (3.4)$$

### 3. CONFIGURACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES

Donde:  $R_1$  es la distancia que recorre el haz en la primera reflexión  
L es la longitud del bloque en el Eje Z  
 $\theta_i$  es el ángulo de entrada del haz incidente

La longitud total que recorrerá el haz en las siguientes reflexiones se describe por:

$$R_m = \frac{L}{\cos(\theta_1)} + \frac{L}{\cos(\theta_1)} + \dots + \frac{L}{\cos(\theta_m)} \quad (3.5)$$

$$R_m = m \frac{L}{\cos(\theta_i)} \quad (3.6)$$

$$R_m = mR_1 \quad (3.7)$$

Con la expresión 3.7 queda demostrado analíticamente que el camino óptico del haz se incrementará un número de veces  $m$  igual al total de reflexiones internas que se efectúen. Se espera que esto mismo se suscite en cuestiones de sensibilidad, es decir, que aumente proporcionalmente al camino óptico.

Con la finalidad de automatizar este cálculo, del cual se proyectarán las dimensiones finales del sistema, además de precisar el ángulo de entrada del haz así como el número óptimo de reflexiones internas para las dimensiones determinadas, procedí a programar en Matlab el algoritmo propuesto (Apéndice B), como una herramienta adicional para el diseño de un sensor de flujo de calor en configuración de múltiples reflexiones.

El programa compilado en Matlab, inicialmente indica las dimensiones del bloque con perspectiva desde plano YZ; posteriormente solicita al usuario que ingrese el ángulo de entrada del haz incidente con respecto al eje horizontal Z, calculando y determinando de manera automática el número de reflexiones totales, la distancia total de la trayectoria del haz, así como también muestra la distancia del plano Y (altura) donde se efectuará la última reflexión con el fin de colocar a esa altura el colimador de salida para recuperar la señal.

#### 3.1.2 Montaje experimental

El sistema de sensado sigue contando con los mismos elementos mostrados para el diseño anterior, esto es: la señal láser es emitida por la fuente láser S1FC1550 de Thorlabs con una longitud de onda de 1550 [nm]; utilicé fibra óptica monomodal Corning SMF 28 como guía de onda de la señal, sin embargo, a diferencia del sistema anterior, uno de los colimadores fue sustituido, específicamente el colimador de entrada, ahora es de la marca Newport modelo F-COL-9-15-FCAPC con un diámetro del haz  $< 0.5$  [mm] y un ángulo de divergencia de  $0.25^\circ$ . El diámetro del colimador es de 10.5[mm]. El colimador de salida es el modelo F220FC-C de la marca ThorLabs, que cuenta con un diámetro del haz de 0.8 mm y

### 3. CONFIGURACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES

con ángulo total de divergencia de  $0.118^\circ$ . Por otra parte, el fotodetector utilizado es de la marca OZ optics, montado con cabeza de sensado de InGaAs para la detección el espectro NIR-IR(Near Infrared - Infrared). Además cuenta con interfaz a la PC con la finalidad de efectuar la adquisición de datos, con una tasa de 7 muestras por segundo.

Inicialmente se tenía previsto que las caras del bloque correspondientes al plano  $XY$  fueran metalizadas con un depósito por evaporación de aluminio, pero este procedimiento no fue montado por problemas de logística. Para sustituir esta característica del sensor, fueron colocados un par de espejos de alta reflectancia (capacidad de las superficies de reflejar la luz, y se define por la relación entre el flujo luminoso reflejado y el flujo luminoso incidente), con el objetivo de ocasionar las reflexiones internas del haz incidente. La reflectancia presentada por los espejos es del 46%, mientras que existe un total de pérdidas de potencia del 57% en el sistema de sensado. Estas pérdidas corresponden a la deficiencia en el acoplamiento de los elementos (pérdidas por reflexiones debido a la alineación no ortogonal del bloque respecto del eje de transmisión, colimadores con mala divergencia, alineación del colimador de salida respecto de la trayectoria del haz, etcétera...).

Es de suma importancia destacar 3 condiciones que se debieron cumplir experimentalmente para establecer las dimensiones del sensor de flujo de calor en configuración de múltiples reflexiones buscando que el haz efectúe el máximo número de reflexiones. Estas condiciones son:

- La distancia “b” en la Fig.3.1 debe ser mayor de 10.5[mm], es decir, que esta supere la altura del colimador de entrada, y posteriormente pueda incidir en el espejo para continuar con las reflexiones internas. Para ello será necesario modificar el ángulo  $\theta_i$  de entrada del haz incidente.
- El bloque debe presentar las dimensiones para conservar la distancia de 4.5[mm] en el eje  $X$  entre el haz incidente y la fuente de calor (cara del bloque con película absorbente). Cabe señalar que si ésta se modifica respecto del diseño del capítulo anterior, no será posible realizar una comparación entre ambos modelos en cuestiones de sensibilidad. Para garantizar esta condición, el bloque será tan ancho como el diámetro del colimador de entrada.
- Debida a la gran pérdida de potencia que se ocasiona por los espejos, será conveniente prolongar las dimensiones del bloque en el eje  $Z$ , es decir, la distancia  $L$  de la Fig. 3.1 y realizar un número menor a 5 reflexiones. Es decir, lograr el camino óptico mayor con el menor número de reflexiones.

Las dimensiones del bloque de acrílico fueron establecidas con la ayuda del programa del Apéndice B, y finalmente resultaron: 25[mm] en dirección del eje  $Z$ , 10[mm] en el eje  $Y$ , 10[mm] que corresponden al eje  $X$ . Una de las características primordiales en este nuevo

### 3. CONFIGURACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES

diseño es una extensión superior horizontalmente respecto a su altura (eje  $Y$ ) y profundidad (eje  $X$ ), esto se debe a que se eligió aumentar la trayectoria óptica en la mínima cantidad de reflexiones, ya que la señal presentaba pérdidas notorias cada vez que el haz se reflejaba con las paredes internas del bloque debido a la calidad de los espejos. Sin embargo, esto será corregido si se aumenta la reflectancia de los espejos con un depósito directo de aluminio.

En cuanto a la fuente de calor para este sistema de sensado, se decidió teñir de negro una de las caras axiales del bloque de acrílico (plano  $YZ$ ) para ser excitada por efecto fototérmico con la lámpara utilizada en el diseño previo. Finalmente se eligió proyectar un sensor que ejecutara 3 reflexiones internas, presentando un ángulo de entrada del haz incidente de  $7^\circ$  respecto al plano horizontal, con una longitud de la trayectoria total de 75.5 [mm], mientras que la altura en la que el haz se refleja por tercera ocasión es de 9.2 [mm]. La Fig. 3.3 muestra las características descritas:

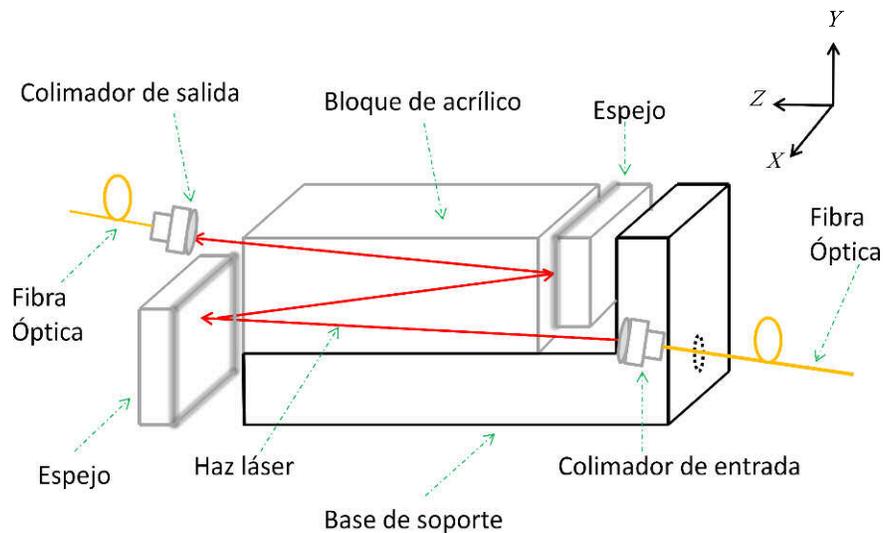


Figura 3.3. Esquema del montaje experimental del sensor de flujo de calor en configuración de múltiples reflexiones.

#### 3.1.3 Ajuste mecánico

Un aspecto fundamental para la detección de la señal de salida es la perfecta alineación entre ambos colimadores, debido a que el haz mantiene un ángulo de inclinación respecto al eje  $Z$  a lo largo de la trayectoria que describe, fue necesario montar el colimador de salida a una platina de desplazamiento lineal en el eje  $Y$ , garantizando así la altura adecuada, además el montaje cuenta con una platina giratoria con resolución de 1 [min-arc] que proporciona la resolución necesaria para alinear el haz de salida en la lente colimadora (Fig.3.4). También fue necesario que el bloque de acrílico fuera sujetado a una base diseñada para proporcionar un contacto perfecto con los espejos de alta reflectancia (adheridos a la misma base), lo que provocaría las reflexiones internas del haz. La base contiene un barreno donde se posiciona el colimador de entrada en un ángulo de  $7^\circ$  respecto al eje horizontal  $Z$ .

### 3. CONFIGURACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES

Además el conjunto base – bloque de acrílico se encuentran colocados sobre una platina lineal que permite la alineación respecto al eje  $X$ .

Para completar el montaje experimental, se incorporó al sistema de sensado antes descrito, la fuente de luz utilizada en el diseño anterior, que funge como la fotoexcitación que produce el efecto fototérmico. Recordemos que una de las caras del bloque, correspondiente al plano  $YZ$  contiene una película absorbente negra.

La Fig. 3.4 ilustra una fotografía del montaje experimental e incluye los elementos de ajuste mecánico.

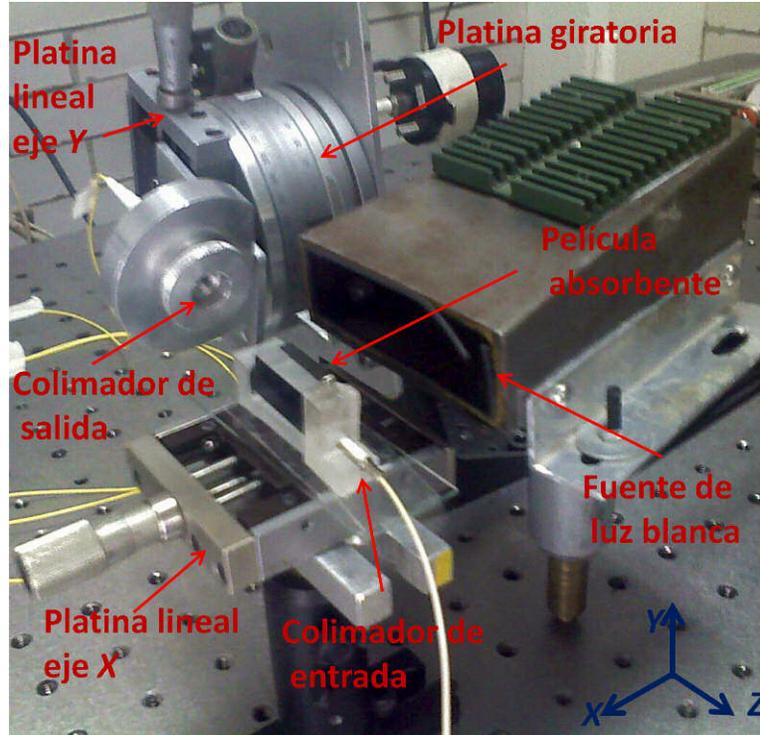


Figura 3.4. Montaje experimental del sistema de sensado completo para el sensor de flujo de calor en configuración de múltiples reflexiones.

#### 3.2 Resultados Experimentales

Utilizando el montaje experimental descrito e ilustrado anteriormente, realicé pruebas de calibración del sensor de flujo de calor en configuración de múltiples reflexiones. A continuación se presenta la descripción detallada de los procedimientos de medición y la calibración del dispositivo:

##### 3.2.1 Medición de Flujo de Calor

La medición inició encendiendo la fuente de calor a los 10[s] con una duración de 410[s] aplicando  $8[\text{mW}/\text{cm}^2]$ . La distancia entre el bloque de acrílico y la fuente de luz es de 45[mm]. Una vez transcurrido este intervalo de tiempo, la lámpara se apagó (420[s]) y se aguardó hasta completar los 800[s] para finalizar la medición. Este procedimiento fue

### 3. CONFIGURACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES

efectuado 4 veces para realizar la prueba de repetibilidad en el monitoreo del flujo de calor. Cabe señalar que se consideró el tiempo suficiente entre cada medición, para que la señal de entrada retomará su valor inicial y continuar con el siguiente monitoreo.

Los resultados correspondientes al procedimiento descrito se grafican en la Fig. 3.5:

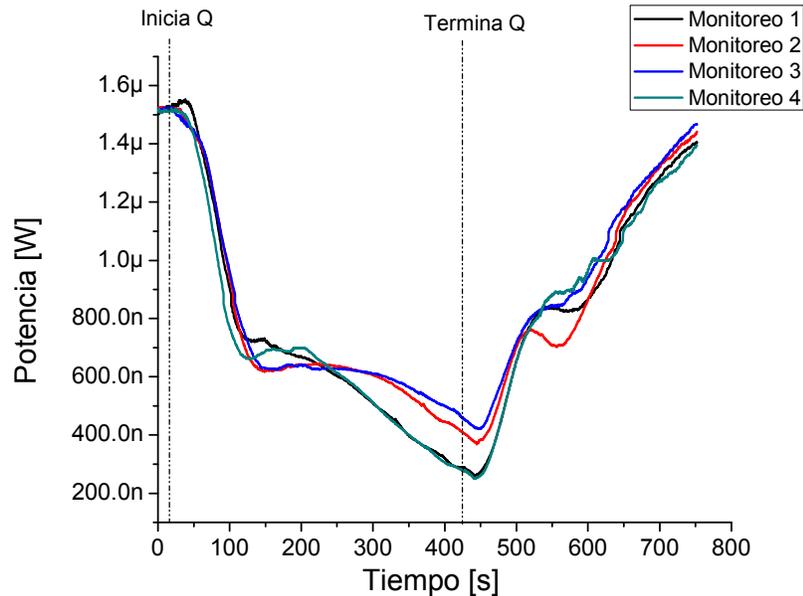


Figura 3.5. Curva de respuesta del sensor en configuración de múltiples reflexiones para un flujo de calor aplicado de  $8 \text{ [mW/cm}^2\text{]}$ .

Manteniendo el intervalo de tiempo de  $410\text{[s]}$  en que la fuente de calor se encuentra encendida, la potencia sufre un decremento mayor con el sensor de múltiples reflexiones respecto del prototipo inicial con trayectoria lineal, esto es, la variación de potencia en la configuración actual presenta una disminución de potencia del 80%, mientras que en la del capítulo anterior sólo disminuye 45% aproximadamente. Otro punto que puedo destacar, es que el intervalo de tiempo en el que la pendiente toma su valor máximo ha disminuido, siendo ésta una ventaja, que indica que el nuevo diseño del sensor de flujo de calor detecta variaciones de potencia con mayor rapidez. Además la pendiente de la recta ha sido incrementada en esta nueva configuración manteniendo constante la distancia entre la fuente de calor y el haz incidente ( $45\text{[mm]}$ ).

#### 3.2.2 Calibración del sensor en la configuración de múltiples reflexiones

La calibración del sensor es parte medular de este proyecto, debido a que la gráfica resultante permite establecer el rango dinámico, y además se convierte en una herramienta indispensable para calcular la sensibilidad del sistema, siendo ésta la pendiente de la recta de linealización de la respuesta del sensor para diferentes valores de flujo de calor aplicado, de la misma forma en que se describió en el apartado 2.1.3.4.

### 3. CONFIGURACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES

Para alcanzar este fin, realicé mediciones donde se varió el valor del flujo de calor aplicado. Específicamente se efectuaron 4 monitoreos, cada uno con diferentes niveles, donde se esperaba que la variación de potencia disminuyera o se incrementara de manera proporcional al valor del flujo de calor aplicado en el mismo intervalo de tiempo. Nuevamente la fuente de calor es encendida durante los primeros 410 [s] de la medición, posteriormente se apaga con fines de monitoreo de la señal mientras se recupera hasta llegar a los 800[s], concluyendo así el experimento.

La Fig. 3.6 corresponde a la representación de los datos de este experimento obtenidos para cuatro pulsos de calor entre 3.3 – 8 [(mW)/cm<sup>2</sup>]:

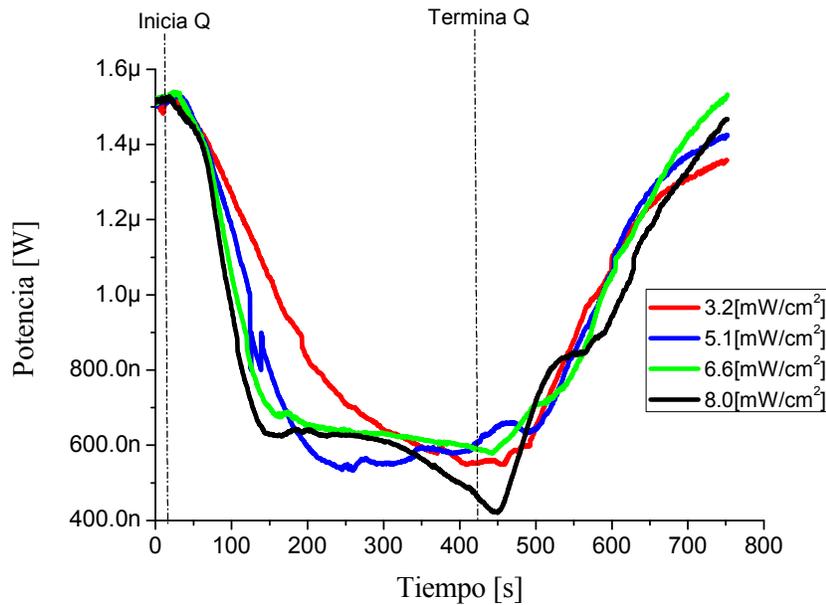


Figura 3.6 Curvas de respuesta del sensor en configuración de reflexiones múltiples para diferentes valores de flujo de calor aplicado.

La Fig. 3.6 indica que se mantiene la tendencia obtenida para la configuración lineal del capítulo 2, donde la potencia de salida sufre un decremento de valor proporcional al calor del flujo de calor aplicado, es decir, la pendiente de la disminución del valor de potencia es mayor cuando se aplica un flujo de calor más significativo, de igual manera esta prueba se realizó en el mismo intervalo de tiempo en que la fuente de calor es accionada.

Posteriormente, se analizan los datos de la Fig. 3.6 con el siguiente procedimiento:

- Se establece un intervalo de tiempo para el cual se presenta la pendiente crítica (donde toma su mayor valor). Cabe mencionar, que este intervalo será el mismo para todas las curvas consideradas en la calibración.
- Se calcula la diferencia de potencia de la señal de salida para cada flujo de calor aplicado que le corresponde.

### 3. CONFIGURACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES

La tabla 3.1 correspondiente a los datos de la calibración del sensor de múltiples reflexiones se muestra continuación:

	Flujo de Calor [mW/cm <sup>2</sup> ]	t <sub>1</sub> [s]	t <sub>2</sub> [s]	ΔP [W]	Δt[s]
Q1	3.284	40	90	200E-09	50
Q2	5.115	40	90	290E-09	50
Q3	6.677	40	90	360E-09	50
Q4	8.0	40	90	420E-00	50

Tabla 3.1. Datos de calibración del sensor de flujo de calor en configuración de múltiples reflexiones

Para concluir con la calibración del sensor de flujo de calor en configuración de reflexiones múltiples, se graficaron los datos contenidos en la Tabla 3.1. El eje de las abscisas corresponde al flujo de calor aplicado, mientras que el eje de las ordenadas está dado por la variación de potencia de la señal de salida. Se realizó una linealización de los datos utilizando el método de mínimos cuadrados. La pendiente de la recta de linealización corresponderá a la sensibilidad del dispositivo con la configuración actual. La recta de calibración se ilustra en la Fig. 3.7:

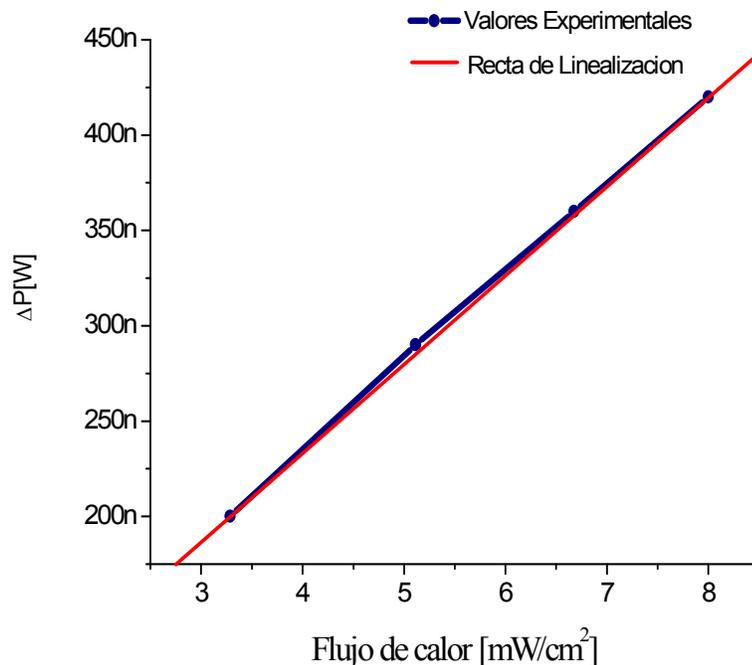


Figura 3.7 Recta de calibración de los valores experimentales de la respuesta del sensor en configuración de reflexiones múltiples para diferentes flujos de calor aplicado.

### 3. CONFIGURACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES

Finalmente, con la Fig. 3.7 culmina la calibración del sensor y ésta sirve como herramienta para obtener los parámetros de funcionamiento del sensor, que se resumen de la siguiente manera:

- Sensibilidad =  $46.65[\mu\text{W}/(\text{mW}/\text{cm}^2)]$
- Rango dinámico =  $3.0 - 9.0[\text{mW}/\text{cm}^2]$
- Resolución =  $0.4 [\text{mW}/\text{cm}^2]$

#### ***3.3 Medición de flujo de calor en tejido hepático aviar***

Uno de los objetivos finales es efectuar mediciones de flujo de calor en tejidos orgánicos, siempre que los parámetros de nuestro diseño fueran apropiados para la detección de las propiedades térmicas a medir. Sería de trascendental importancia contar con estos datos, ya que de ser así, en un futuro se podrían caracterizar y utilizar el sensor de flujo de calor para detectar enfermedades del hígado como la cirrosis.

Se ha planteado un objetivo inicial para este nuevo experimento, el cual es determinar si el sensor de flujo de calor en configuración de múltiples reflexiones tiene la suficiente sensibilidad para detectar cambios en las propiedades térmicas del tejido. Si este monitoreo se realiza exitosamente, se buscará un patrón para interpretar los resultados. El experimento se llevará a cabo particularmente utilizando una muestra hepática aviar.

El nuevo sistema de medición de flujo de calor está basado en los montajes experimentales de las pruebas anteriores, dado que los colimadores, la fuente láser y el fotodetector son idénticos al sistema de sensado de la Fig. 3.3. El elemento que marca la diferencia en esta prueba, es sustituir la película absorbente excitada por la fuente de calor regulada (Fig. 3.4) por una incisión de tejido (rebanada delgada de hígado de pollo fresco) que mantendrá una temperatura constante en la primera prueba (temperatura estática), y que aumentará gradualmente su valor en la segunda prueba (temperatura dinámica). Para controlar la temperatura en la superficie de la muestra, se fijó una placa de aluminio que presionaba al tejido contra la pared del bloque de acrílico, y ésta a su vez era calentada por un cautín eléctrico. Sin embargo, fue necesario utilizar un controlador de temperatura PID de la marca Emko modelo ESM-4420, el cual incorpora un termopar tipo J. Se muestran fotografías de este montaje en la Fig.3.8:

### 3. CONFIGURACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES

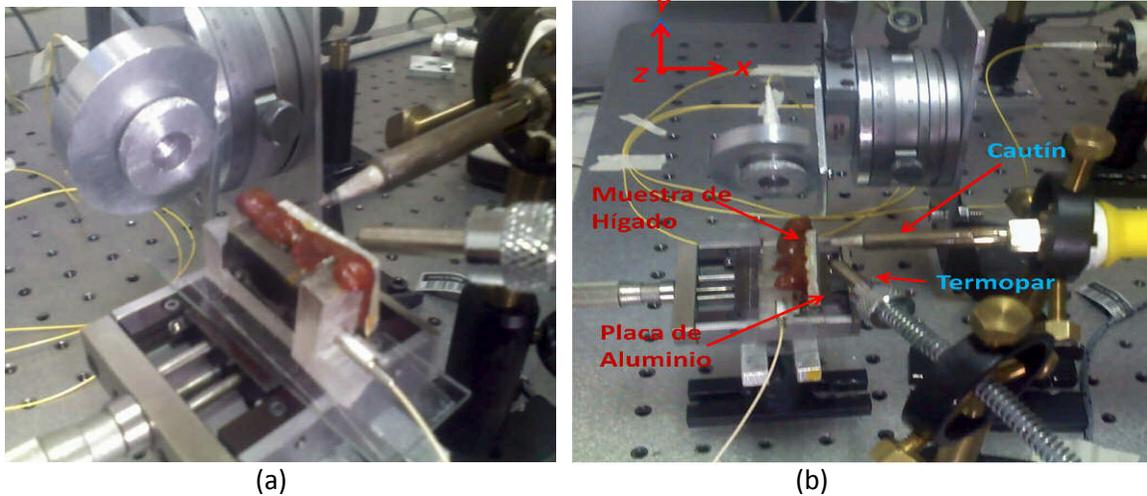


Figura 3.8. Imágenes del montaje experimental para las pruebas con Hígado. (a) Vista diagonal. (b) Vista superior.

El procedimiento de medición de la prueba estática se llevó a cabo colocando la muestra de tejido presionada contra el bloque de acrílico los primeros 410[s], recordando que en este caso el flujo de calor se establece por la diferencia de temperatura entre las caras planas del bloque de acrílico, es decir, una se encuentra a temperatura ambiente y la otra se encuentra a la temperatura de la muestra hepática. Posteriormente, la placa de aluminio y el cautín fueron retirados del sistema para monitorizar la recuperación de señal, que físicamente representa el efecto cuando el haz incidente retoma el camino óptico original al corregir la desviación en su trayectoria originada por el enfriamiento. La Fig. 3.9 corresponde a los datos localizados de este monitoreo:

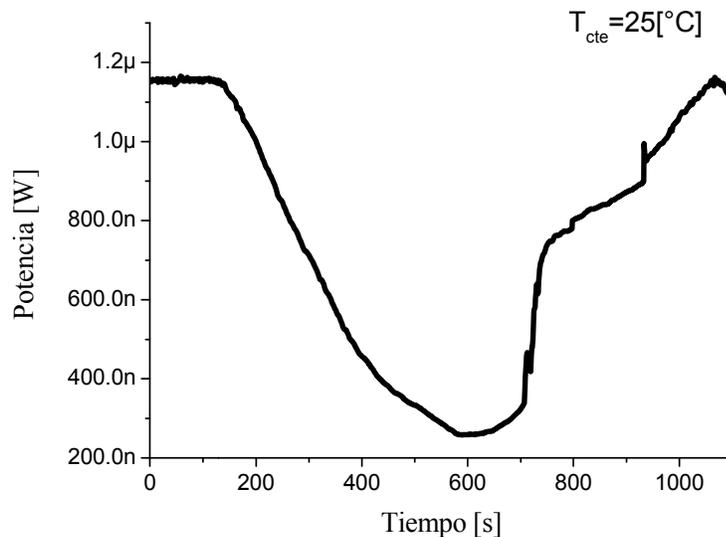


Figura 3.9. Curva de respuesta del sensor en configuración de múltiples reflexiones para la prueba estática de temperatura a 25[°C] utilizando una muestra hepática de pollo como fuente de calor.

### 3. CONFIGURACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES

La Fig. 3.9 muestra que el valor de sensibilidad fue capaz de detectar el calor emitido por una muestra orgánica. Se puede apreciar, que al aplicar un flujo de calor la potencia decrece un 75% aproximadamente en un intervalo de 410[s]. Otro dato a destacar es que posteriormente en el tiempo de recuperación, el valor de potencia alcanza su valor inicial cuando habían transcurrido 1000[s], esto nos indica que existe una gran disipación de calor ocasionada por la placa de aluminio con la que se presiona la muestra del tejido.

Por último culmino mi trabajo de tesis efectuando las mediciones correspondientes al monitoreo de la respuesta del sensor de flujo de calor en configuración de múltiples reflexiones, utilizando como fuente de calor la muestra hepática y presentando una prueba dinámica de temperatura. Para ello se ajusta el control de temperatura buscando obtener un aumento gradual y constante, específicamente el tejido aumentaba periódicamente 1[°C] cada 30 segundos; El valor de temperatura inicial de la prueba es de 20[°C] (intentando emular la temperatura ambiental promedio de la ciudad de México) y culminaba a los 90[°C]. Los resultados experimentales se presentan a continuación:

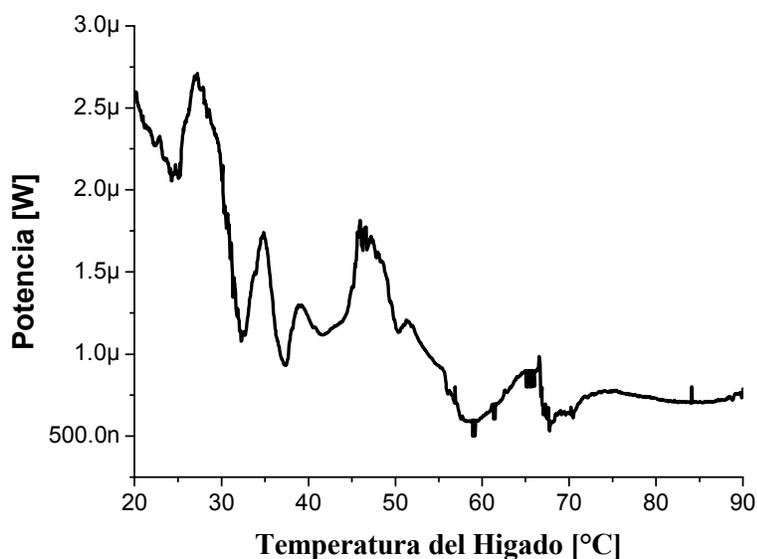


Figura 3.10. Curva de respuesta del sensor en configuración de múltiples reflexiones para la prueba dinámica de temperatura utilizando una muestra hepática de pollo como fuente de calor.

Los resultados de la Fig. 3.10 efectivamente establecen que existe una disminución de la potencia de salida cuando se aumenta gradualmente la temperatura del tejido orgánico, esto se debe a los cambios estructurales del hígado de pollo, tales como la desnaturalización de proteínas, así como la deshidratación del mismo. Es importante señalar que la muestra hepática se carboniza en su totalidad al alcanzar la temperatura de 90[°C]. Por otro lado, actualmente con los experimentos realizados, resulta imposible identificar las proteínas y demás biomoléculas involucradas, que presentan una modificación en su estructura, sin embargo, este experimento establece las bases para continuar con esta investigación.

### 3. CONFIGURACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES

A continuación se presenta una tabla donde se resumen los cambios estructurales identificados en el experimento donde la temperatura de la muestra hepática aumenta gradualmente de 20-90[°C].

Alteración de la estructura molecular de la muestra hepática como respuesta al aumento gradual de la temperatura.	
Rango de temperatura	Efectos térmicos en el tejido hepático
20-25[°C]	Se presenta una disminución de potencia debido a la aplicación de flujo de calor, similarmente a las curvas obtenidas en los experimentos con la fuente calibrada.
25-30[°C]	Existe un aumento en la potencia de salida, lo que indica que se comienzan a alterar las propiedades térmicas (estructura molecular) de la muestra orgánica, y por ende se presenta una diferencia en la conducción del calor.
25-30[°C]	El valor de la potencia disminuye como respuesta del flujo de calor que el tejido hepático aplica sobre el bloque de acrílico.
35-50[°C]	Se obtienen valores donde la potencia oscila, ocasionados por la reducción enzimática y por el inicio de la deshidratación en el tejido.
50-70[°C]	Existe una tendencia donde la potencia de salida disminuye como respuesta de la desnaturalización de proteínas y colágena. El tejido se empalidece e inicia la necrosis celular.
70-90[°C]	Deshidratación total de la muestra (evaporación de agua) y carbonización de la misma, representada por un valor constante de potencia.

*Tabla 3.2. Resumen del cambio estructural de la muestra hepática como respuesta al aumento de temperatura.*

#### **3.4 Conclusiones del capítulo**

El sensor de flujo de calor en configuración de múltiples reflexiones presenta una sensibilidad de  $4.665E-8$ [W/(mW/cm<sup>2</sup>)] empleado en un rango de 3.0 – 9.0[mW/cm<sup>2</sup>] y presentando una resolución de 0.4[(mW)/cm<sup>2</sup>]. La trayectoria óptica total que recorre el haz dentro del bloque de acrílico es de 75.5[mm] cuando el ángulo de entrada es de 7°.

Validando la hipótesis inicial del proyecto, se incrementó de manera notoria la sensibilidad con la nueva configuración del sensor manteniendo la misma distancia entre haz incidente y la fuente de calor, esto es un incremento cercano al 300%. Además de la demostración analítica, experimentalmente se obtuvieron resultados donde la trayectoria descrita por el haz es 3 veces mayor en la configuración de múltiples reflexiones por lo que se concluye que la sensibilidad es proporcional a la distancia de la trayectoria óptica. Cabe mencionar que se

### 3. CONFIGURACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES

ha reducido el tiempo de la pendiente crítica (capacidad de detección más veloz), lo que se considera como un aspecto favorable para la nueva configuración del sistema de sensado.

Otro aspecto favorable de este nuevo diseño es la notoria minimización de las dimensiones del bloque de acrílico presentando 2500[mm<sup>2</sup>] en la configuración actual, por 6000[mm<sup>2</sup>] del sensor en trayectoria lineal, lo que corresponde a un decremento del 60% aproximadamente de su volumen inicial. De esta manera se cumple el objetivo de diseñar un sistema más compacto. Además, las dimensiones del diseño presentado en este capítulo consideraron la longitud de las muestras hepáticas, así como del número óptimo de reflexiones internas ocasionadas por un determinado ángulo de entrada del haz incidente, suficiente para que la altura en la segunda reflexión libre por completo el diámetro del colimador de entrada, y continúe con las demás reflexiones.

Una limitante en el sistema de la configuración de múltiples reflexiones es la implementación con los espejos de alta reflectancia, debido a que con ellos se presenta una pérdida de potencia de 57%. Idealmente se busca que la transmitancia de la señal sea del 100%, y para intentar alcanzar este valor se propone sustituir estos espejos por un depósito de evaporación de aluminio en ambas caras del bloque de acrílico, con lo que se prevé que exista un valor menor de pérdida de potencia en las reflexiones que en el diseño actual. Otro aspecto que se podría optimizar, es la adaptación de un colimador con menor divergencia angular (0.25°) que el utilizado en la entrada de la señal (Newport modelo F-COL-9-15-FCAPC), de esta manera se presentarían menores pérdidas de potencia.

Además, los parámetros del sensor en configuración de múltiples reflexiones (rango, resolución, sensibilidad) fueron capaces de detectar el flujo de calor emitido por una muestra hepática. La curva presenta grandes similitudes a los resultados obtenidos con la fuente controlada de calor (película absorbente excitada por la fuente de luz blanca), esto es, existe un decremento en la potencia cuando la fuente de calor está presente en el experimento, y al retirar esta del montaje, se presenta una recuperación del valor de la potencia de salida. Finalmente de la prueba dinámica de temperatura se obtuvieron resultados favorables, que nos indican que el sensor de flujo de calor en configuración de reflexiones múltiples es capaz de detectar los cambios de flujo de calor que representan modificaciones en su estructura y composición del tejido orgánico. Esto se concibe como una exhortación para continuar la investigación, y caracterizar las propiedades térmicas en los órganos humanos, que culmine con un prototipo de sensado para la identificación de alguna patología en específico.

### CONCLUSIONES GENERALES

El presente proyecto de tesis concluye con el diseño de un sensor de flujo de calor que presenta la configuración de múltiples reflexiones, con características de detección similares a los dispositivos que se encuentran actualmente en el mercado (apéndice C), sin embargo, posee cualidades propias de los sensores ópticos que se pueden considerar como ventajas frente a ellos, tales como inmunidad a la interferencia electromagnética, facilidad de sensado remoto, viabilidad de sensado en ambientes húmedos o corrosivos. Sus parámetros de operación son:

- Sensibilidad =  $4.665E-8$  [W/(mW/cm<sup>2</sup>)]
- Rango dinámico = 3.0 – 9.0 [mW/cm<sup>2</sup>]
- Resolución = 0.4 [mW/cm<sup>2</sup>]

Es de gran importancia destacar que el tiempo de detección ha sido reducido de 145[s] a 50[s], lo que representa una reducción de aproximadamente 65% respecto del prototipo inicial [5], obteniendo de esta manera un sensor de respuesta más veloz. Cabe señalar que la configuración de múltiples reflexiones conserva la distancia inicial entre el haz incidente y la fuente de calor (45[mm]). También en el diseño actual se ha aumentado 1500% el valor de la relación Señal/Ruido, es decir, la configuración del sensor de flujo de calor en múltiples reflexiones presenta una mayor estabilidad al ruido mecánico, obteniendo un valor de factor señal a ruido FSR=3730, mientras que el prototipo de trayectoria lineal presentaba un FSR=250.

El diseño actual presenta un aumento en el valor de la resolución respecto del prototipo inicial. En esta configuración se obtuvo un valor de resolución de 0.4[mW/cm<sup>2</sup>] por 0.3[mW/cm<sup>2</sup>] obtenido en el sensor de trayectoria lineal. Este aumento en el valor de la resolución se atribuye principalmente al incremento de sensibilidad del dispositivo, que físicamente corresponde a la desviación en el camino óptico del haz y que se suscita en cada reflexión (3 iteraciones), lo que ocasiona que el mínimo incremento cuantificable sea notablemente mayor que en la configuración del sensor con trayectoria lineal.

Por otra parte, el objetivo fundamental de este trabajo de tesis fue alcanzado dado que la sensibilidad obtenida con el sensor configuración de reflexiones múltiples, ocasiona una variación de potencia en la pendiente crítica de la curva de respuesta del 35% mientras que la configuración del haz lineal presentaba una variación de potencia de 11% en un intervalo de tiempo igual y aplicando el mismo valor de flujo de calor. Esta optimización representa el aumento del 300% de la sensibilidad del nuevo diseño, aunado a la disminución considerable en las dimensiones del sistema de sensado (de 6000[mm<sup>3</sup>] a 2500[mm<sup>3</sup>]). En cuanto a la trayectoria óptica dentro del bloque se obtuvo un recorrido total de 75.5[mm] cuando el haz presentaba un ángulo de entrada de 7°, mientras que la configuración lineal presentaba

## 4. CONCLUSIONES GENERALES

únicamente un recorrido de 24.5[mm], por lo se puede concluir que la proporción que existe entre las longitudes del camino óptico, se conserva en cuestiones de sensibilidad de detección.

Los parámetros de funcionamiento del sensor en configuración de múltiples reflexiones fueron capaces de detectar el flujo de calor proporcionado por una muestra hepática aviar. Del experimento en que se somete al tejido a temperatura constante, concluyo que el dispositivo posee la suficiente sensibilidad para detectar variaciones de flujo de calor, lo que indica que aplicando este procedimiento en distintas muestras hepáticas con condiciones iniciales variadas se podría llegar a caracterizar patologías asociadas a este órgano. Por otro lado, también se realizó exitosamente la prueba dinámica de temperatura en el tejido, de la que se obtuvieron resultados que avalan que el sensor diseñado detectó los cambios estructurales y de composición de la muestra orgánica como respuesta al cambio en sus propiedades térmicas. Actualmente sabemos que la curva de respuesta registra variaciones de flujo de calor que corresponden a la desnaturalización de proteínas, además de la deshidratación del tejido, sin embargo, será necesario continuar con la investigación para identificar propiamente qué biomoléculas están presentes en este experimento, y en qué momento es que éstas responden térmicamente.

Finalmente, planteo que sería viable optimizar este dispositivo de sensado de flujo de calor si se realiza un depósito metálico directamente en las caras del bloque en sustitución de los espejos utilizados, buscando de esta manera obtener menores pérdidas de potencia causadas por cada reflexión que realiza el haz. Otra propuesta para reducir las pérdidas en la potencia de salida es adherir los colimadores de entrada y salida al bloque de acrílico en lugar de colocarlos en las platinas (lineales y angulares) utilizadas en el montaje experimental. Simultáneamente propongo utilizar un colimador de entrada con menor ángulo de divergencia ( $0.25^\circ$ ), lo que ayudaría a obtener un menor diámetro en el spot del haz transmitido, que culmine en una mayor recuperación de potencia de salida.

Este trabajo concluye con la caracterización de una nueva configuración del sensor de flujo de calor llamada múltiples reflexiones, continuando así el trabajo iniciado por el equipo de la Dra. Celia Sánchez [4,5] hace algunos años. De esta manera se comprueba experimentalmente la hipótesis inicial donde se planteaba que, prolongando la trayectoria del haz incidente dentro del bloque de acrílico, se incrementaría como consecuencia la sensibilidad del dispositivo. Pese a que el diseño del sensor de flujo presentado a lo largo de este manuscrito significa un gran avance en el campo de los sensores basados en fibra óptica, su trascendental importancia radica en cimentar las bases para diseñar un dispositivo aún más compacto, quizá micrométrico, que utilice esta configuración, además que sea capaz de medir flujo de calor de tejido orgánico (hígado humano) y que se encuentre montado en una sonda invasiva, valiéndose de tecnología laparoscópica y representando así, una herramienta para la detección oportuna de cirrosis, puesto que identificaría la etapa en la que se encuentra la enfermedad llamada fibrosis. Este proyecto de aplicación biomédica tendría constitución multi-institucional, respaldado por la unidad de investigación del Hospital General de la ciudad de México en conjunto con el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM.

Ciudad Universitaria, 2011.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **NAGAI AH**, N.R. *et al.* "Novel polymer derived ceramic-high temperature heat flux sensor for gas turbine environment". Journal of Physics: Conference Series 34 p.p.458–463. 2006.
2. **GAMBINO**, Richard J. *et al.* "Integrated Heat-Flux Sensors for Harsh Environments Using Thermal-Spray Technology". IEEE Sensors Journal, Vol. 6, No. 5, OCTOBER 2006.
3. **CHUN**, Jaechul *et al.* "Design and Fabrication of Micro Heat Flux Sensor". International Conference on Intelligent Robots and Systems 0-7803-51 84-3/990 2009 IEEE.
4. **SÁNCHEZ-PÉREZ**, Celia *et al.* "Sensor de Flujo de Calor utilizando el Efecto Fototérmico incorporado en un Sistema de Fibra Óptica". Congreso de Instrumentación, Ensenada, Baja California. 25 de Octubre de 2006.
5. **SOTO-ASTORGA**, Rocío del Pilar. "Diseño y caracterización de un sensor de flujo de calor". Tesis de Licenciatura. UNAM 2006
6. **ARENAS**, Gustavo *et al.* "Aplicaciones de un sensor de fibra óptica a la medición no invasiva de desplazamientos y vibraciones en el rango micro y sub-micrométrico", Buenos Aires, Argentina. Octubre 2007.
7. **CADENA**, Oscar *et al.* "Diseño y Construcción de Prototipo para medición de Flujo de Calor aplicando Calorimetría Directa: Sensado por Flujo de Calor". Dyna, Año 75, Nro. 155, pp. 181-184. Medellín, Julio de 2008.
8. **KOLLAR**, Erno *et al.* "3x3 heat-flux sensor array for the thermal measurement of IC packages". 26th International Spring Seminar on Electronics Technology Se & Lesni, Slovak Republic. p.p.7 - 18 May 8 - 11,2003.
9. **MALACARA-HERNÁNDEZ**, Daniel. "Óptica Básica". Editorial Fondo de Cultura Económica, 2da. Edición pp.28-30. México 2004.
10. **SÁNCHEZ-REYES**, Jazmín Ivette."El Láser de CO2 como herramienta para las microlesiones en los tejidos biológicos". Tesis de Licenciatura. UNAM 2004
11. **SALAZAR-GUERRERO**, Evelyn. "Sistema de Alta Inmunidad al Ruido en Sensores de Fibra Óptica y su Aplicación a la Medición de Flujo de Calor". Tesis de Licenciatura. UNAM 2006.
12. **WARK**, Kenneth. "Termodinámica" Editorial Mc Graw Hill , 5a Edición pp. 12 – 20. México 2005.
13. **GARCÍA-VALENZUELA**, Augusto *et al.* "Planar integrated optical sensors based on The mirage effect". Measurement Science and Technology. México. Marzo 2010.
14. **SPEAR**, Jonathan. "Transverse photothermal beam deflection within a solid". Journal of Applied Physics. Vol. 70, No 2. Pp- 20-27. Julio, 1991.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

15. **DONGXIAO**, Liu *et al.* "A Novel Temperature based Flat-Plate Heat Flux Sensor for High Accuracy Measurement". 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Singapore, July 14-17, 2009
16. **MAC PHERSON**, W.N. et al. "Heat flux measurement using fibre-Bragg-grating Fabry-Pérot" sensors. *Meas. Sci. Technol.* Vol. 10. pp. 34-41. Septiembre, 1999.
17. **SAGRARIO**, Daniel. et al: "Axial and angular displacement fiber-optic sensor". *APPLIED OPTICS*, Vol. 37, No. 28,1 October 1998.
18. **SHEN**, Yonghang et al. "Fiber-optic system for heat flux measurement". *Review of Scientific Instruments*. Vol. 75, No 4. pp. 15-23. . Abril, 2004
19. **Catálogo de sensores en línea:**  
<http://www.directindustry.es/prod/wuntronic/sensores-de-flujo-de-calor-de-capas-delgadas-58481-454480.html>

## APÉNDICE A

```

% Programa para calcular la funcion de transmitancia del sensor de angulo
utilizando dos          %
% colimadores de fibra optica.
%
% La funcion de transmitancia calcula la integral de recubrimiento de un
haz gaussiano con un    %
% corrimiento h con el area de la circunferencia del colimador de salida
%
%
%divergencia angular a 20mm 0.65°
clear all
clc

R=5; %Radio del area del nucleo de la fibra en el colimador de recepcion
w=7.8;%Diametro del modo fundamental en la fibra monomodal Corning SMF28
h=[-12:1:12];%Corrimiento lateral del haz dada la deflexión fotototermica
x=[-R:2*R/1000:R];%Intervalo de distancia para la evaluacion de la integral
deltax=2*R/1000;%Paso para evaluar la integral
f=4500;% distancia focal del colimador del sensor de angulo por separado

Icero=(1/(sqrt(pi/2)*w))^2;          %Intensidad del haz gaussiano

for i=1:1:size(h,2)
    h(i)
    for j=1:1:size(x,2)
        inter(i,j)=Icero*(w/sqrt(2))*sqrt(pi)*(exp(-(h(i)-
x(j))^2)/(w^2/2))*erf(sqrt(R^2-x(j)^2)))*deltax;
    end
    Pout(i)=sum(inter(i,:));
end

% Calcula numericamente la integral con la funcion trapz

for i=1:1:size(h,2)
    Y=Icero*(w/sqrt(2))*sqrt(pi)*(exp(-(h(i)-
x).^2/(w^2/2)))*erf(sqrt(R^2-x.^2));
    Z(i)=trapz(x,Y);
end

plot(h,Pout);
hold on
plot(h,Z,'bo');
xlabel('desplazamiento lineal (micras)');
ylabel('intensidad (u.a.)');
hold off

figure(2)
teta=(h/f).*(180/pi)*60; %Conversion del desplazamiento lateral en
desplazamiento angular minarc
plot(teta,Pout);
xlabel('desplazamiento angular (min arc)');
ylabel('intensidad (u.a.)')

```

## APÉNDICE B

A continuación se presenta el código del programa de Matlab utilizado para el cálculo de las dimensiones del sensor de flujo de calor en configuración de múltiples reflexiones, cabe mencionar que existen algunas anotaciones que facilitan la comprensión del mismo.

```

clear;close all;clc;
disp ('Las dimensiones del bloque en [mm] son: h=Altura total del bloque
R0=Longitud inferior del bloque')
h=10%Todas las acotaciones son en mm
L=25%Dimension de la longitud inferior del bloque

for n=1:8
    if n==8
        disp('Esta es la ultima iteración ')
    end
    teta=input('Ingresa el valor del angulo de entrada del haz incidente
en grados: ')
    a=L*tand(teta);
    if a<=h,
        R1=L/cosd(teta);
        b=2*a;
        if b<=h,
            R2=2*R1;
            c=3*a;
            if c<=h,
                R3=3*R1;
                d=4*a;
                if d<=h,
                    R4=4*R1;
                    e=5*a;
                    if e<=h,
                        R5=5*R1;
                        f=6*a;
                        if f<=h,
                            R6=6*R1;
                            g=7*a;
                            if g<=h,
                                R7=7*R1;
                                k=8*a;
                                if k<=h,
                                    R8=8*R1;
                                    disp('La altura del haz en la última
reflexión en [mm] es:')
                                    k
                                    disp('El recorrido total del haz en
el interior del bloque en [mm] es')
                                    Rt=8*R1
                                    disp('El numero de reflexiones
internas es:8')
                                else
                                    disp('La altura del haz en la última
reflexión en [mm] es:')
                                    g

```

```

disp('El recorrido total del haz en
    el interior del bloque en [mm] es')
Rt=7*R1
disp('El numero de reflexiones
    internas es:7')
end
else
disp('La altura del haz en la última
    reflexión en [mm] es:')
f
disp('El recorrido total del haz en el
    interior del bloque en [mm] es')
Rt=6*R1
disp('El numero de reflexiones internas
    es:6')
end
else
disp('La altura del haz en la última reflexión en
    [mm] es:')
e
disp('El recorrido total del haz en el interior
    del bloque en [mm] es')
Rt=5*R1
disp('El numero de reflexiones internas
es:5')
end
else
disp('La altura del haz en la última reflexión en
[mm] es:')
d
disp('El recorrido total del haz en el interior
del bloque en [mm] es')
Rt=4*R1
disp('El numero de reflexiones internas es:4')
end
else
disp('La altura del haz en la última reflexión en [mm] es:')
c
disp('El recorrido total del haz en el interior del bloque
    en [mm] es')
Rt=3*R1
disp('El numero de reflexiones internas es:3')
end
else
disp('La altura del haz en la última reflexión en [mm] es:')
b
disp('El recorrido total del haz en el interior del bloque
    en [mm] es')
Rt=2*R1
disp('El numero de reflexiones internas es:2')
end
else
disp('La altura del haz en la última reflexión en [mm] es:')
a
disp('El recorrido total del haz en el interior del bloque en
    [mm] es')

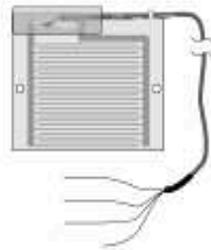
```

```
        Rt=R1
        disp('El numero de reflexiones internas es:1')
    end
else
    disp('La altura del haz en la última reflexión excede las
        dimensiones del bloque:')
end
end
end
```

APÉNDICE C



**Sensores para medidas de humedad en suelos, humectación y flujo de calor**  
**227/223, 257/253, 237/237F y HFP01**



**Introducción**

Este folleto describe una pequeña selección de sensores fabricados o no por Campbell Scientific a fin de permitir la construcción de un sistema de adquisición de datos personalizado.

Conectados a un datalogger de Campbell Scientific, las lecturas de los siguientes sensores pueden procesarse en tiempo real para proporcionar, por ejemplo:

- El potencial de agua en suelo en bares, (227/223/257/253)
- La humectación de las hojas en porcentaje (100% significa que la hoja está saturada)(237/237F)
- El flujo de calor del suelo en  $Wm^{-2}$  (HFP01)
- El máximo, el mínimo, la media o la desviación estándar de cualquier parámetro.

**Bloques de humedad en suelo 227 y 223**

Los bloques de yeso proporcionan un método práctico y económico de estimación del potencial hídrico del suelo. El bloque cilíndrico de Delmhorst está constituido de dos bloques de yeso que envuelven dos electrodos concéntricos, que hacen circular corriente por el interior del bloque, reduciendo

de forma apreciable el potencial por bucles a tierra.

El bloque de yeso debe reemplazarse regularmente. Los sensores 257 y 253 ofrecen una mayor robustez.

**Características Principales**

- ✓ Sensores simples y seguros
- ✓ Conexión directa al datalogger
- ✓ Longitudes largas de cable bajo pedido
- ✓ Suministramos programas ejemplo
- ✓ Compatibles con multiplexores para experimentos a gran escala

**Aplicaciones típicas**

- ✓ Construcciones de edificios
- ✓ Estimaciones de Evapotranspiración (Eto)
- ✓ Monitorización Medioambiental
- ✓ Ensayos agricultura

## Bloques de yeso 227 y 223

### Calibración

El yeso presente entre los electrodos y el suelo crea un tapón contra las sales que pueden afectar la conductividad eléctrica y por tanto la calibración del bloque. Son necesarias recalibraciones para obtener medidas precisas del potencial hídrico.

### Mantenimiento

Los bloques de yeso tienen una duración típica de uno a dos años. Los suelos ácidos y salinos degradan los bloques más rápidamente. Para aumentar la duración de vida de los bloques, y si no son utilizados, es recomendable retirarlos del suelo durante el invierno. Los bloques instalados en superficie pueden helarse y agrietarse, los bloques en profundidad pueden no estar en contacto con el suelo. Sea cual sea la profundidad, los bloques dejados durante el invierno están sujetos a la corrosión.

### Compatibilidad

El sensor 227 está preparado para ser utilizado directamente con el datalogger. El sensor 223 no tiene condensadores de desacoplo y se utiliza con el multiplexor AM16/32 únicamente. Una resistencia de precisión de 1k $\Omega$ , 0.1% (no suministrada) es necesaria para completar el puente con un sensor 223.

- Rango de medida de 0.1 a 10 bares.
- Longitud standard de cable: 7.5m
- 20mm de diámetro, y 28mm de longitud

## Sensores de humedad en el suelo 257 y 253

### Descripción

Los sensores 257 y 253 ofrecen una mayor robustez que los sensores 227 y 223. Estos sensores están fabricados por Watermark y están constituidos de dos electrodos concéntricos envueltos en un material de referencia. El material de

### Medida

El cálculo del potencial hídrico se puede hacer directamente en el datalogger. El cálculo necesita la medida de la temperatura en suelo, que puede ser dada por un sensor como la sonda de temperatura 107 de Campbell Scientific.

### Compatibilidad

El sensor 257 está configurado para utilizarse con un datalogger. La sonda 253 no tiene condensadores de desacoplo y debe utilizarse con el multiplexor AM16/32 únicamente. Hacer notar que una resistencia de precisión de 1k $\Omega$  0.1% (no suministrada) es necesaria para hacer el puente con una sonda 253.

- Rango de medida de 0 a 2 bares.
- Longitud de cable standard: 7.5m
- Tamaño de 22mm de diámetro y de 80mm de long

Contacte con nosotros para otros métodos de medida de humedad del suelo.

## Rejilla Humectación de hoja 237

### Descripción

La rejilla de humectación de hoja 237 es como un tipo de hoja artificial que puede utilizarse con un datalogger. El sensor está constituido por un circuito con láminas de cobre chapadas en oro. La condensación sobre el sensor disminuye la resistencia entre las láminas, y esta variación es medida por el datalogger. Se usa una excitación en ac a fin de prevenir toda degradación del sensor.

### Revestimiento

Las gotas suficientemente pequeñas para no tocar dos láminas no varían la resistencia del circuito. Esta es la razón por la cual ciertos usuarios aplican una pintura de recubrimiento que extiende las gotas.

- La resistencia varía entre 3000k $\Omega$  (seca) y 1k $\Omega$  (húmeda). El punto de transición del sensor sin pintura es

### Rejilla humectación flexible 237F

Basado en un diseño del Silsoe Research Institute (Bedford, UK) bajo el patrocinio de Horticultural Development Council, el sensor 237F es una versión flexible del 237 adaptada a las superficies tales como los tallos de las plantas. Se suministra sin cable ni resistencias para completar el puente de medida. Contacte con nosotros para más información sobre la configuración e instalación.

## Placa de flujo de calor HFP01

El HFP01 mide flujos de calor, siendo las aplicaciones más comunes la medida de flujo de calor en el suelo (medidas del balance de energía) y en los muros (balance de energía en edificios).

El sensor del HFP01 es una termopila que mide la temperatura diferencial a través del cuerpo de plástico del HFP01. Suponiendo que el flujo de calor sea estable, que la conductividad térmica del cuerpo sea constante y que el sensor tenga poca influencia en el conjunto del flujo térmico, la tensión de salida es entonces directamente proporcional al flujo de calor local.

Precisión:  $\pm 20\%$  para los totales por día sobre un rango de conductividad térmica de 0.1 a 1.7W/mK y un rango de temperatura de  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $+70^{\circ}\text{C}$ .

Sensibilidad E (nominal): 50 $\mu\text{V/Wm}^{-2}$   
Dependencia de conductividad térmica:  $\pm 15\%$  sobre un rango de 0.1 a 1.7W/mK  
Dependencia de temperatura (estimación):  $< 0.1\%^{\circ}\text{C}$

Estabilidad:  $< 1\%$  de variación por año para una utilización meteorológica normal  
Dimensiones: 80mm de diámetro, 5mm de espesor, longitud standard de cable 5m.