UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SENSOR DE FLUJO DE CALOR BASADO EN FIBRA ÓPTICA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

PRESENTA:

ROCÍO DEL PILAR SOTO ASTORGA

DIRECTORA DE TESIS: DRA. CELIA A. SÁNCHEZ PÉREZ

CIUDAD UNIVERSITARIA 2006

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por no dejarme sola.

Dedico este trabajo realizado a mi abuelita que es la persona que más amo en el mundo, a mi abuelito por creer siempre en mí, a Agustín, Lalo, Lupita, Dulce y a todos mis tíos y tías que siempre me han apoyado y mostrado su cariño .A Petra por la sonrisa tan dulce y sincera que siempre me regalaba al saludarme. Gracias.

A mi hermana Arantza y a mis primos latosos.

Agradezco a mis amigos Mónica, Mauricio, Angie, Viridiana, Juan y Enrique por su amistad y compañía a lo largo de estos años en la Universidad y más allá. Gracias Itzel por tu amistad de tantos años y que espero siga muchos más.

Gracias Erik por toda tu ayuda y gracias también a los geolos por todas sus atenciones y por haberme ayudado en esos momentos difíciles.

A mis papás por los instantes de sonrisas.

También agradezco a Hugo, Salvador y Angélica por su amabilidad y compañía. A Evelyn, no se que hubiera sido de mi si no hubieras estado para ayudarme a empezar.

Gracias a la SAFIR por dejarme ver las lunas de Júpiter y los anillos de Saturno.

Quiero darles gracias también al Dr. Augusto y al Dr. Eduardo por su apoyo y por permitirme aprender de ustedes. Al Ing. Barcenas por no olvidarse de mi y a todos los profesores que contribuyeron en mi formación académica.

Agradezco especialmente a la Dra. Celia por darme la oportunidad de realizar este trabajo y por todo el apoyo que me ha brindado y sigue brindando.

Gracias a todas las personas que guardo en mi corazón.

Rocío del Pilar

ÍNDICE

Introducción …… 1

1. Antecedentes ..…… 3
   1.1 Principios básicos de funcionamiento para algunos dispositivos ……..… 3
      1.1.1 Láser …….……... 3
      1.1.2 Detectores …… 4
      1.1.3 Colimadores ……...……. 4
   1.2 El haz gaussiano ……..……..…… 5
      1.2.1 Haz láser gaussiano …… 5
      1.2.2 Propagación de la luz en una fibra óptica monomodal ……....…... 5
      1.2.3 Parámetros del haz gaussiano ……..…… 8
   1.3 Algunos métodos para la medición de flujo de calor ……..……..…… 12

2. Efecto fototérmico aplicado a la medición del flujo de calor ……..…… 16
   2.1 Deflexión del haz por efecto fototérmico ……..……... 16
   2.2 Campo de temperatura ……..…… 17
      2.2.1 Transferencia de calor …….. 17
         2.2.1.1 Métodos de transferencia de calor …...……..… 17
         2.2.1.2 Reflexión y transmisión de ondas térmicas ……...……..… 19
      2.2.2 Obtención del campo de temperatura en el material termo-óptico .....… 20
   2.3 Principio de funcionamiento del sensor de flujo de calor ……..……... 22

3. Sensor de ángulo en fibra óptica modulado en intensidad ……..……..…… 24
   3.1 Sensores de intensidad ……...……... 24
      3.1.1 Tipos de sensores de intensidad …...……...……. 24
      3.1.2 Características de los sensores ……...…….. 25
   3.2 Principio de funcionamiento del sensor de ángulo ……... 26
   3.3 Implementación del sensor de ángulo ……..……...…… 30
   3.4 Resultados ……...…….. 35

4. Diseño del sensor de flujo de calor ……..……..…… 43
   4.1 Implementación del sensor de flujo de calor ……...…….. 43
   4.2 Resultados de medición de flujo de calor ……..……..... 48
      4.2.1 Prueba de repetibilidad ……..……...…… 48
      4.2.2 Medición de ruido en el sistema ……...……..……....…..…… 49
      4.2.3 Prueba de reversibilidad ……..……..…… 50
      4.2.4 Calibración instrumental y análisis de resultados ……...…. 53

Conclusiones ……. 59

Referencias …… 61

INTRODUCCIÓN

En esta tesis se presenta el trabajo que realicé en el CCADET sobre el desarrollo de un sensor de flujo de calor basado en fibra óptica.

Los sensores de flujo de calor son muy utilizados en distintos procesos como son la manufactura de elementos, en la industria, para meteorología y física de suelos así como para la caracterización de materiales entre otros usos.

Varios aspectos deben ser tomados en cuenta para la elaboración de un buen sensor de flujo de calor [(1)], una de estas consideraciones consiste en que la parte de radiación absorbida por un sensor, la emisividad (*e*), no es del 100% por lo que el flujo de calor absorbido es diferente del flujo de calor incidente. Todos los sensores de flujo de calor solo miden el flujo absorbido.

La presencia del sensor invariablemente altera la distribución del flujo de calor donde está montado por lo que es necesario minimizar este efecto.

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. En este caso sería necesario algún tipo de sistema refrigerante. Por esta misma razón de no llegar rápidamente al equilibrio térmico es necesario que el sensor no se encuentre aislado, es decir que debe encontrarse montado en un elemento que disipe el calor absorbido.

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 este mida adecuadamente .

También debe tenerse muy en cuenta la distancia a la que se encuentra el sensor de la fuente de calor debido a que decae a razón del cuadrado de la distancia de la fuente por lo que el sensor debe estar cuidadosamente posicionado para asegurar la exactitud de los resultados.

Varios métodos actuales para la medición de calor hacen uso de termopares y termopilas en los que la medición de flujo de calor se hace de forma indirecta utilizando la medición de temperatura en dos puntos distintos. Los termopares consisten en la unión de dos metales distintos que produce un potencial eléctrico proporcional a la diferencia de temperatura en los extremos del metal por lo que la exactitud de este elemento depende de un punto de referencia en el cual la temperatura de ambos metales sea la misma. Una termopila es un arreglo de termopares en serie para lograr tener mayor sensibilidad.

Entre los trabajos realizados recientemente para la medición de flujo de calor se tienen los sensores que miden el flujo a través de termopilas que son construidos en microcircuitos

electrónicos [2, 3, 4, 5] y los sensores basados en fibra óptica [6,7] que utilizan interferometría y fluorescencia de la señal.

Los sensores en fibra óptica ofrecen grandes ventajas sobre otros sistemas como alta sensibilidad, son ligeros y tienen inmunidad a la interferencia electromagnética. La posibilidad de sensado remoto es mayor lográndose menores perdidas y puede llevarse a cabo también una multi-canalización [8].

En esta tesis se presenta un sensor de flujo de calor basado en fibra óptica en una configuración simple con respecto a los sistemas encontrados en la literatura ya que basa su funcionamiento en la deflexión de un haz láser producto de la aplicación de calor a un bloque de material termo-óptico y la detección de ésta deflexión como un cambio de la intensidad del haz utilizando un sensor de ángulo en fibra óptica. La detección del cambio de intensidad de la señal de salida puede ser relacionada directamente con el flujo de calor.

El presente manuscrito está organizado de la siguiente manera: en el primer capítulo se presentan lo elementos que nos ayudan a entender la forma del haz que se propaga a través de los diferentes elementos del sistema. Las bases termodinámicas que se necesitan para analizar el principio de funcionamiento del sensor de flujo se analizan en el segundo capítulo.

El tercer capítulo presenta el desarrollo y resultados obtenidos para un sensor de ángulo en fibra óptica. Este sensor fue analizado independiente del resto del sistema de flujo de calor. Para esto se analizó la respuesta eléctrica en el fotodetector proveniente del cambio de intensidad recibida debido a la diferencia del ángulo de incidencia del haz entre dos colimadores. También se llevaron a cabo mediciones con un desplazamiento lateral y otras con desplazamiento angular entre los colimadores, esto para tener una estimación del efecto navaja producido por el área receptora de la fibra y el área receptora de los colimadores.

Una vez realizadas las pruebas al sensor de ángulo se hicieron mediciones con el sensor de flujo de calor, esta vez con el propósito de caracterizar su respuesta. Para lo cual, se efectuaron mediciones utilizando una lámpara incandescente como fuente de calor aplicada a una de las caras de un bloque de acrílico como medio para el sensado. Con el fin de que el calor fuera absorbido por el acrílico se aplicó una película delgada polimérica de color negro en esta cara del bloque. Se hicieron mediciones utilizando una fuente láser a 1550 nm aplicando diferentes potencias de la lámpara incandescente y diferentes tiempos de exposición. Estas pruebas fueron realizadas varias veces con el fin de determinar la reproducibilidad del sistema.

En el cuarto capítulo se presenta la implementación y resultados obtenidos de esta caracterización.

Capítulo 1. Antecedentes

En esta sección se mostrará el funcionamiento básico de los dispositivos ópticos utilizados para el desarrollo de este trabajo. Así mismo, se dará una breve explicación sobre la forma del modo fundamental que se propaga en una fibra monomodal con el fin de exponer su naturaleza gaussiana misma que será utilizada en los análisis teóricos del sensor.

1.1 Principios básicos de funcionamiento para algunos dispositivos ópticos

Los dispositivos ópticos utilizados en este trabajo fueron la fuente de luz láser, fotodetectores semiconductores y colimadores de haz proveniente de una fibra óptica. A continuación se hace una explicación del principio físico que rige a estos elementos.

1.1.1 Láser

El haz emitido por un sistema láser (***L****ight* ***A****mplification by* ***S****timulated* ***E****mission of* ***R****adiation*) tiene como características el ser monocromático, colimado, coherente y de alta densidad de potencia.

Se conoce como inversión de población a la condición en la que los electrones se encuentran en el nivel de energía más alto de un átomo, este fenómeno es lo primero que se necesita para un sistema láser. Para lograr que esto ocurra en el material activo del láser es necesario una fuente de excitación o bombeo para que luego, mediante emisión estimulada, la energía almacenada debido al cambio en el nivel de energía sea liberada en forma de fotones.

El material activo es el que va a determinar la frecuencia de la luz que se genera y también la energía necesaria para el bombeo donde esta última es mayor que la energía que se obtiene del sistema.

Otro elemento de un sistema láser es el resonador que permite almacenar energía y proveer retroalimentación al material activo para mantener el proceso de emisión estimulada. Los resonadores se implementan con espejos donde uno de ellos tiene una reflectancia menor al 100 % para dejar pasar el haz, esta pérdida en el resonador es lo que se utiliza en un sistema láser.

Cuando la ganancia neta de un fotón que hace un recorrido completo en el material activo es igual a la unidad, la reacción en cadena se hace crítica y se produce el efecto láser, para que este proceso se auto-mantenga es necesaria cierta corriente llamada corriente de umbral. También es necesario que en la cavidad resonante se produzca interferencia constructiva en las oscilaciones por lo que la longitud de la cavidad debe ser un múltiplo entero de la media longitud de onda de la luz para lograrlo.

1.1.2 Detectores

En el foto-efecto interno, los portadores foto-excitados (electrones y huecos) permanecen dentro de una muestra de material, el más importante de estos efectos es la fotoconductividad y es posible usarla para la detección de la respuesta eléctrica debida a algún estímulo; para sistemas de sensado óptico lo más común es el uso de detectores semiconductores que hacen uso de este fenómeno de la foto-conducción.

En los materiales semiconductores existe una región llamada de vaciamiento donde no se tienen portadores libres, pero sí una densidad de carga que genera un campo eléctrico impidiendo el flujo. Los detectores fotoconductivos se basan en el incremento de la conductividad eléctrica debido a luz incidente en esta región.

La absorción de un fotón por un fotoconductor intrínseco lleva a la generación de electrones libres excitados de la banda de valencia a la banda de conducción. Es decir, al incidir un fotón en la zona de vaciamiento se genera un par electrón-hueco que es separado mediante la aplicación de un campo eléctrico al material que lleva a la transportación de los electrones a través de éste y a la consecuente producción de una corriente eléctrica en el circuito eléctrico del detector. Este principio trae como consecuencia la existencia de fotodiodos con diferente capacidad de captación debido a la posibilidad de ampliación de la región de vaciamiento mediante la introducción de un material intrínseco entre la unión p-n.

El uso de fotodiodos como elemento detector en un sistema óptico lleva consigo la implementación de un circuito detector ya que la señal eléctrica a la salida del fotodiodo es pequeña y su variación como respuesta a una excitación también lo es; por lo que el acondicionamiento de la señal resulta una necesidad básica.

1.1.3 Colimadores

Son dispositivos que tienen la finalidad de colimar la luz, en éste caso proveniente de una fibra óptica para tener 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 cuado se tienen rayos paralelos de un haz por lo que la energía solo se propaga en una sola dirección.

Tomando 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 (Figura 1.1).

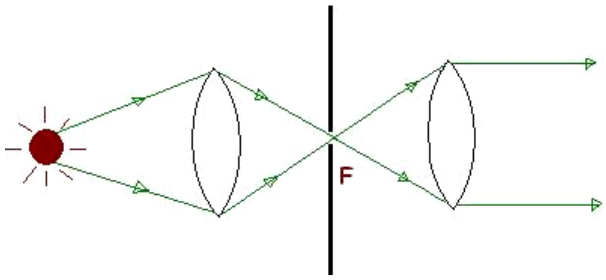


Figura 1.1 Arreglo de colimador

1.2 El haz gaussiano

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.

1.2.1 Haz láser gaussiano

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.

Debido a que los resonadores con espejos planos son muy sensibles a las desalineaciones, los resonadores utilizados en los sistemas láser son generalmente de espejos esféricos. El haz gaussiano nos da una solución a la ecuación de Helmholtz bajo las condiciones de frontera impuestas por los resonadores de espejos esféricos. Por lo tanto, un láser con resonador de espejos esféricos tiene una salida que toma la forma de un haz gaussiano.

1.2.2 Propagación de la luz en una fibra óptica monomodal

Para fibras de contraste bajo (weakling guiding) en las que $n_1 / n_2 \ll 1$, 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 acoplando sólo las componentes transversales del campo eléctrico en sus modos radiado y guiado. El diagrama que muestra la geometría utilizada en la fibra se ve en la Figura 1.2 en donde es señalado a como el radio total de la fibra y r el radio del núcleo de la fibra.

Las ecuaciones de Helmholtz en coordenadas cilíndricas paraa zona del núcleo de la fibra ($r < a$) y para el sustrato ($r > a$) para una fibra de contraste bajo son [9]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 U}{\partial \phi}+\frac{\partial^2 U}{\partial z}+n_1^2k_0^2U=0 \qquad r<a \tag{1.1}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 U}{\partial \phi}+\frac{\partial^2 U}{\partial z}+n_2^2k_0^2U=0 \qquad r>a \tag{1.2}$$

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

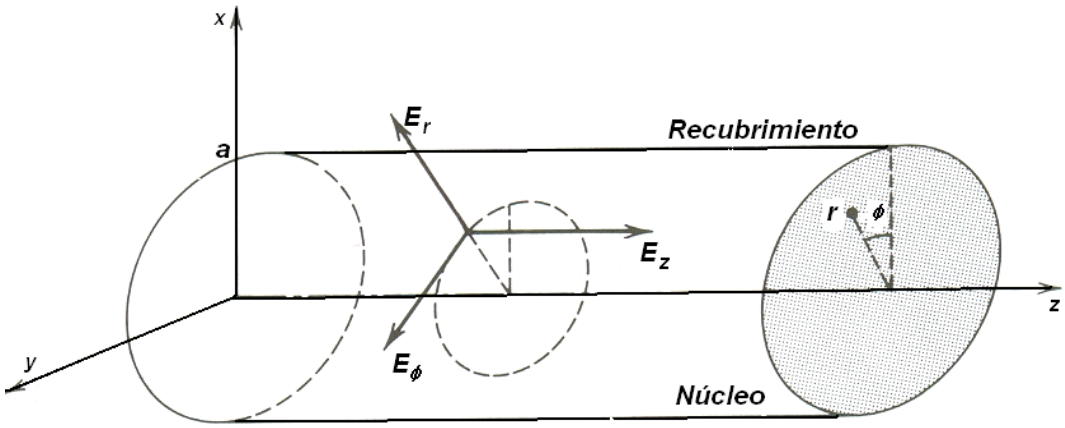


Figura 1.2 Sistema coordenado cilíndrico utilizado en la fibra óptica

Asumiendo una propagación en z con una constante de propagación β se tiene que:

$$U(r,\phi,z)=u(r)e^{-jl\phi}e^{-j\beta z} \qquad \text{para } l = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots. \tag{1.3}$$

Tomando como

$$k_T^2 = n_1^2k_0^2-\beta^2 \tag{1.4}$$

$$\gamma^2 = \beta^2-n_2^2k_0^2 \tag{1.5}$$

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

$$\frac{d^2u}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{du}{dr}+\left(k_T^2-\frac{l_2}{r^2}\right)u=0 \qquad \text{para} \quad r<a \tag{1.6}$$

$$\frac{d^2u}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{du}{dr}+\left(\gamma^2-\frac{l_2}{r^2}\right)u=0 \qquad \text{para} \quad r>a \tag{1.7}$$

Con soluciones:

$$u(r) \propto \begin{cases} J_l(k_T r) & r < a \\ K_l(\gamma r) & r > a \end{cases} \tag{1.8}$$

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.

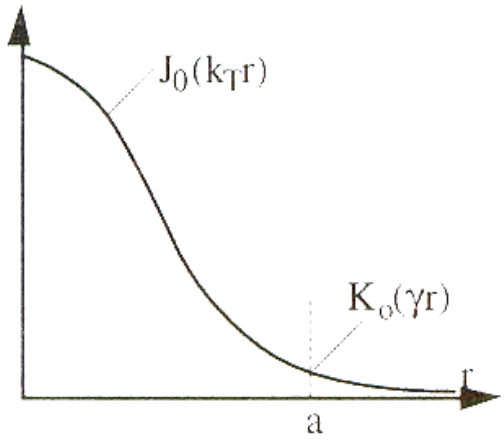


Figura 1.3 Distribución radial del campo para el modo fundamental

Para una fibra monomodal que recibe radiación de un haz gaussiano a través de uno de sus extremos, se tiene que el coeficiente de transmisión es [10]:

$$T = |c_0|^2 \tag{1.9}$$

$$c_0 = \frac{1}{2P}\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\infty} (E \times H_0) e_z r dr \tag{1.10}$$

Donde r y Φ son coordenadas cilíndricas y z es el eje de la propagación. E es el campo eléctrico incidente y P la potencia del campo. H_0 es el campo magnético del modo guiado.

Considerando un haz gaussiano de ancho ω como entrada:

$$E_y = \left| 4\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{P}{\pi n_2 \omega^2} \right|^{1/2} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right) e^{-j\beta z} \tag{1.11}$$

donde μ_0 y ε_0 son la susceptibilidad magnética y permitividad dieléctrica del vacío respectivamente.

Y una expresión para el campo magnético del modo guiado de una fibra monomodal de índice escalonado es [10]:

$$H_{x0} = -\sqrt{\frac{2}{\pi}}\left(\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}\right)^{1/4} \frac{W}{aVJ_1(U)}\sqrt{n_2 P} \begin{cases} J_0\left(U\dfrac{r}{a}\right) & r \le a \\ \dfrac{J_0(U)}{K_0(W)} K_0\left(W\dfrac{r}{a}\right) & r \ge a \end{cases} \tag{1.12}$$

donde $U^2 + W^2 = (n_1^2 - n_2^2)k^2a^2$.

Al sustituir las expresiones (1.12) y (1.11) en (1.10) se puede encontrar el coeficiente de transmisión para una entrada gaussiana que excita el modo HE_{11} de la fibra. Al comparar el valor de este coeficiente de transmisión para el valor en el que la fibra soporta solo un modo como se muestra en la Figura 1.3 se tiene que la distribución del campo de la fibra se acopla adecuadamente a un campo gaussiano.

Una aproximación más general a otro tipo de fibras monomodales como son las de gradiente de índice se puede hacer encontrando los parámetros β (constante de propagación) y w (ancho del haz) para un campo con distribución gaussiana, considerando una fibra de longitud arbitraria y de radio que tiende al infinito. En estas condiciones se tiene una relación entre w y a (diámetro de la fibra) para la cual la aproximación gaussiana resulta más adecuada [11].

Esta aproximación a la distribución gaussiana resulta satisfactoria para describir el campo dentro del núcleo de la fibra siendo no muy eficaz para el campo evanescente, cuya representación exacta se hace mediante funciones modificadas de Hankel.

1.2.3 Parámetros del haz gaussiano

Una expresión para un haz gaussiano en coordenadas cartesianas es la siguiente:

$$u = \Psi(x, y, z)e^{jkz} \tag{1.13}$$

en la cual $k=2\pi/\lambda$ para una longitud de onda λ.y la propagación en dirección del eje Z.

Por lo que para satisfacer la ecuación de onda se tiene:

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2} + j2k\frac{\partial\Psi}{\partial z} = 0 \tag{1.14}$$

Donde el segundo término puede ser despreciado asumiendo una lenta variación de la amplitud Ψ con respecto del eje de propagación, para tener una solución de la forma:

$$\Psi = Ae^{j\left[P(z)+k(x^2+y^2)/2q(z)\right]} \tag{1.15}$$

En esta ecuación, si el factor *A* es una constante se tiene la solución llamada modo fundamental, mientras que si *A* es función de *x* y *y* se tienen los modos superiores. El parámetro *P (z)* es un factor de corrección.

El factor *q (z)* es de gran importancia para la distribución de la fase y la amplitud en el plano transversal de la onda. Tomando $q(z) = z + q_0$ con $q_0 = s+jt$, (donde s es un número real) para satisfacer la ecuación en cualquier punto del plano cartesiano se tiene:

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - j\frac{1}{Q(z)} \tag{1.16}$$

donde

$$\frac{1}{R(z)} = \frac{s+z}{(s+z)^2+t^2} \tag{1.17}$$

$$\frac{1}{Q(z)} = \frac{t}{(s+z)^2+t^2} \tag{1.18}$$

La parte real del número complejo *1/q(z)* especifica la fase de la onda, mientras la parte imaginaria especifica la amplitud de la misma.

Considerando el radio del haz *ω(z)* como la distancia $r = \sqrt{x^2+y^2}$ donde la amplitud del haz tiene un decaimiento de e^{-1}, la parte imaginaria de *q(z)* para $z = -s$ proporciona el tamaño de la cintura del haz que está localizado en la distancia a la cual la *q(z)* es puramente imaginario. En la parte de la cintura del haz, el frente de onda es como una onda plana y no tiene variación en fase en el plano normal a la dirección de propagación.

Para la región de $s+z>0$, el frente de onda diverge mientras que para la región $s+z<0$, el frente de onda es convergente.

Tomando en consideración la cintura del haz como origen del eje de propagación para la simplificación de análisis, se tienen las siguientes expresiones:

$$q(z) = z - j\frac{k}{2}\omega_0^2 \tag{1.19}$$

$$\omega^2(z) = \omega_0^2\left[1+\left(\frac{2z}{k\omega_0^2}\right)^2\right] \tag{1.20}$$

$$R(z) = z\left[1+\left(\frac{k\omega_0^2}{2z}\right)^2\right] \tag{1.21}$$

donde $\omega_0^2 = -2\frac{t}{k}$

De la ecuación (1.20) podemos encontrar la distancia a la cual el área transversal del haz duplica el área de la cintura, esta distancia es conocida como el parámetro focal del haz o bien rango de Rayleigh y está dado por:

$$z_0 = \frac{k}{2}\omega_0^2 \tag{1.22}$$

Utilizando las condiciones para la satisfacción en cualquier punto del plano cartesiano, y la simplificación dada en (1.19), se puede obtener el factor de corrección:

$$P = j\ln\sqrt{1+\left(\frac{2z}{k\omega_0^2}\right)^2} - \phi \tag{1.23}$$

donde $\phi = \tan^{-1}\frac{2z}{k\omega_0^2}$

<u>Amplitud del haz gaussiano</u>

$$u(z) = \underset{\text{Constante}}{A}\ \underset{\text{relación de contracción}}{\frac{\omega_0}{\omega(z)}}\ \underset{\text{frente de onda esférico}}{e^{-j\phi + jk(z+r^2/2R(z))}}\ \underset{\text{distribución de amplitud transversa}}{e^{-r^2/\omega^2(z)}} \tag{1.24}$$

En esta ecuación, el primer factor es la amplitud, mientras el segundo es la variación en la amplitud debido al cambio del radio del haz. El tercer factor representa el frente de onda que llega desde la onda plana en la cintura; así como en el campo lejano, para distancias intermedias el frente de la fase adquiere un frente de onda esférico con un radio de curvatura R(z) pero con un factor de corrección Φ. El último factor representa la distribución transversal del campo en forma de campana.

<u>Distribución de la intensidad de un haz gaussiano</u> **(12)**

$$I(r,z) = I_0\left(\frac{\omega_0}{\omega(z)}\right)^2 e^{-2r^2/W^2(z)} \tag{1.25}$$

Donde I_0 es la amplitud máxima de la intensidad. En la Figura 1.4 se muestra la intensidad del haz gaussiano en función de la propagación.

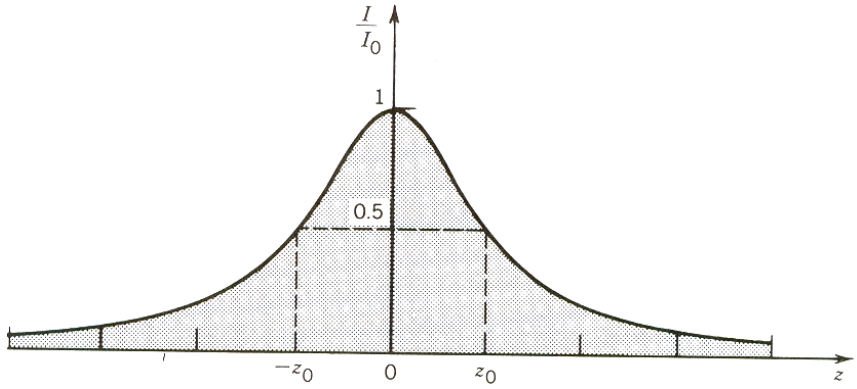


Figura 1.4 Intensidad del haz gaussiano

Transmisión a través de lentes delgadas [9]

Cuando un haz gaussiano atraviesa una lente delgada como se muestra en la Figura 1.5, se altera su frente de onda debido a que la amplitud compleja se ve multiplicada por su factor de fase pero el radio del haz no se ve alterado

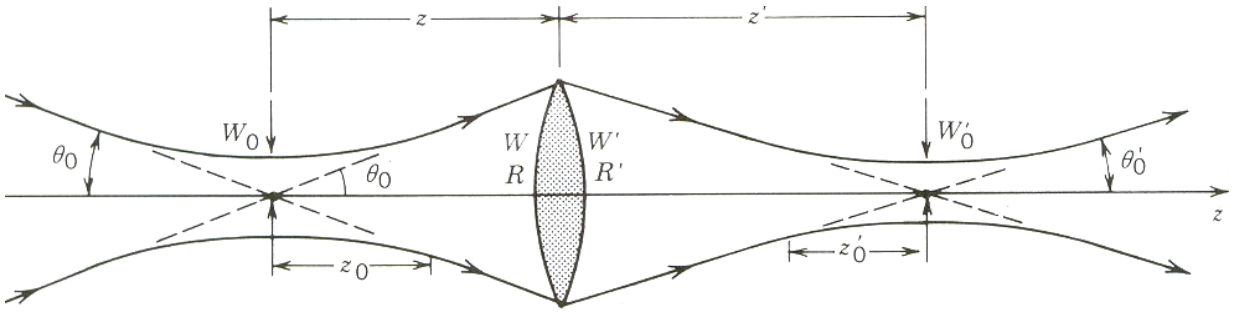


Figura 1.5 Transmisión de un haz gaussiano a través de una lente delgada

Un lente o secuencias de estos pueden utilizarse para enfocar un haz gaussiano sin que esto afecte su forma

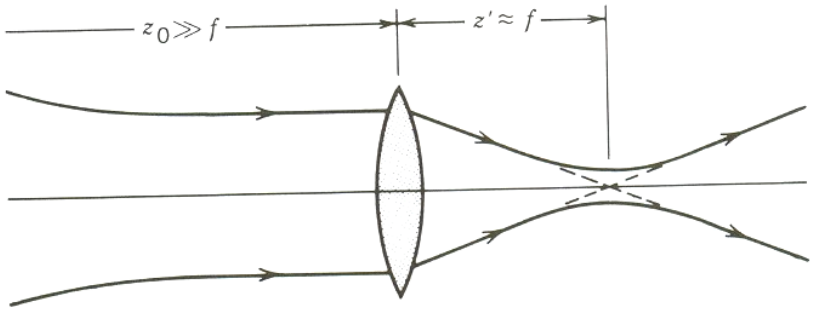


Figura 1.6 Enfoque de un haz colimado

El rayo transmitido a través de una lente con distancia focal *f* es enfocado a un radio de cintura ω_0' a una distancia z' dadas por:

$$\omega'_0 = \frac{\omega_0}{\left[1+\left(z_0/f\right)^2\right]^{1/2}} \tag{1.26}$$

$$z_0 = \frac{f}{1+\left(f/z_0\right)^2} \tag{1.27}$$

Si la profundidad de foco del rayo incidente es mucho mayor que la distancia focal de los lentes entonces se tiene que el rayo transmitido es enfocado aproximadamente en el plano focal de la lente como ocurre con los rayos paralelos, esto se ve en la Figura 1.6.

1.3 Algunos métodos para la medición del flujo de calor

El calor es el movimiento de energía (J) a través de una barrera termodinámica por lo que la transferencia de calor (W) es la tasa a la cual esta energía se mueve a través de la barrera. De esta manera, el flujo de calor se define como la tasa de energía transferida por unidad de área (W/m^2).

La medición del flujo de calor es muy importante en procesos industriales tales como la elaboración de circuitos integrados, en la industria química e incluso en la realización de pruebas experimentales como son la medición en túneles de viento, entre muchas otras aplicaciones.

En la medición de flujo de calor se utilizan actualmente 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 de instrumento como son temperaturas muy altas; es por esta razón por la que el sensado de flujo de calor por medio del uso de sensores con fibra óptica se ha extendido.

Algunas de las características de otros trabajos de investigación realizados para la medición de flujo de calor son:

Microsensor de flujo de calor [(2)]

Este dispositivo mide pequeños flujos de calor por medio del uso de termopares que miden la diferencia en temperatura en dos puntos de una capa de oro.

- sensibilidad $1x10^{-4} \sim 0.01$ V/ (W/cm^2) utilizando un túnel de viento para su calibración.

No se tiene comportamiento uniforme ni lineal.

Sensor de flujo de calor "blow-off"[3]

Se tiene una distribución de temperatura en un medio poroso atravesado por una corriente de gas de enfriamiento. Esta corriente de gas tiene como finalidad:

- enfriar la superficie del instrumento
- evitar que la superficie se ensucie
- hacer posible las distinción entre radiación y convección del flujo de calor hemisférico
- ajustar el rango del instrumento al nivel del flujo a medir
- separar la capa de frontera de la superficie del sensor

El sensado se realiza por medio de termopares que miden diferencia de temperatura en puntos del medio poroso y se monitorea también la temperatura del líquido refrigerante.

Microsensor termoeléctrico [4]

Es un sensor basado en una termopila de 10 membranas con 889 termopares cada una. Este dispositivo cuenta con una película calentadora que sirve para poder ser auto-calibrado.

- sensibilidad 58.7 V/ (W/cm^2)
- tiempo de respuesta 40-50 ms

Necesita protección para la influencia de la convección

Sistema híbrido para la medición de flujo de calor [5]

En este trabajo utilizaron dos sistemas de medición, uno directo basado en microsensores y otro indirecto basado en una cámara CCD.

Microsensores. Miden la dirección y magnitud del flujo de calor

- respuesta de 2~6 µs
- temperatura superior a los 850 ºC
- sensibilidad $150x10^{-6}$ V/(W/cm^2)
- exactitud ± 3%

El sensor es un termopar diferencial que mide también la temperatura del propio sensor para hacer correcciones.

Cámara CCD. Utiliza un dispositivo CCD para obtener la distribución de irradiancia.

El objetivo no enfriado viaja por el camino óptico e intercepta el haz reflejado tan cerca como sea posible en el plano de medición. La distribución de un mapa en escala de grises representa la forma del haz que llega al receptor por lo que para relacionarlo con las unidades a medir necesita de calibración.

Sistema en fibra óptica para el sensado de flujo de calor [6]

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 ºC.

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.

Medición de flujo de calor utilizando sensores de Fabry-Perot con rejillas de Bragg [7]

En este sistema son utilizadas rejillas de Bragg para definir una cavidad de Fabry-Perot. Cuando el calor entra por uno de los extremos del elemento sensor que está expuesto al cambio a detectar. La energía térmica queda confinada dentro del sensor y provoca los cambios de fase.

Para el arreglo empleado en este trabajo es posible medir pulsos de calor de duración de 0.6 segundos dada la profundidad de la cavidad a la que se encuentra la rejilla de Bragg.

En este trabajo se tuvo una resolución de 0.6 W cm^{-2} con una limitación de ancho de banda debida al nivel de ruido presentado que tiene como posible causa el procesamiento de la señal entregada como diferencia de fase.

Existen también numerosos dispositivos comerciales a base de termopilas como los que fabrica la marca Hulkseflux en los que se tiene una sensibilidad de 200 V/(W/cm^2) a 3000 V/(W/cm^2). Estos sensores tienen una forma de “plato” que van de los 2.5 cm a los 15 cm de diámetro según el modelo.

Conclusiones

En este capítulo se pudo ver la forma en la que un haz se propaga a través de una fibra monomodal observando la naturaleza de su perfil gaussiano en los diferentes dispositivos utilizados, es decir se logró entender que el haz manejado en los análisis tiene una forma de onda gaussiana que no se pierde al transmitirse a través de la fibra óptica ni al pasar por los colimadores. Esto es útil de entender porque el haz generado por la fuente láser tiene un perfil gaussiano que después se propaga a través de varias lentes (en los colimadores) en donde no pierde su forma gaussiana.

Como otro elemento dentro de los antecedentes, se expusieron algunos métodos para la medición de flujo de calor donde se destaca que los dispositivos elaborados en fibra óptica se encuentran aun en etapa de investigación mientras que los que existen comercialmente basan su funcionamiento en termopilas.

Capítulo 2. Efecto fototérmico aplicado a la medición de flujo de calor

El diseño del sensor de flujo de calor basa su funcionamiento en el efecto fototérmico, que provoca la elevación del índice de refracción debido al aumento en la densidad de un medio expuesto a una fuente de calor que le transfiere energía. Este cambio en índice de refracción tiene como consecuencia que la luz desvíe su camino al atravesar dicho material propagándose en la parte en que el índice de refracción tenga menor valor.

Este efecto de deflexión del haz así como el cambio de temperatura en el material serán analizados en el presente capítulo.

2.1 Deflexión del haz por efecto fototérmico

Ésta es la técnica en la que está basado el sistema de flujo de calor. El efecto fototérmico se ha empleado en muchas ocasiones para encontrar características de materiales, en estas aplicaciones la detección se ha enfocado a la medida de la deflexión del haz de prueba.

Para determinar el ángulo de deflexión θ 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 [13]:

$$\theta = \int \frac{\nabla n}{n} dz \tag{2.1}$$

donde

$$\nabla n = \frac{dn}{dT} \nabla T \tag{2.2}$$

$\frac{dn}{dT}$ coeficiente termo-óptico del medio
n índice de refracción del medio
∇T gradiente de temperatura transversal al camino óptico del haz de prueba

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

$$\theta = \frac{1}{n} \frac{dn}{dt} \int \nabla T(r,t) ds \tag{2.3}$$

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

2.2 Campo de temperatura

En esta sección se obtuvo una expresión para determinar el comportamiento térmico en el bloque de material termo óptico encontrando el campo de temperatura dentro del mismo.

2.2.1 Transferencia de calor

Cuando diferentes partes de un cuerpo se encuentran a diferentes temperaturas, existe un flujo de calor con dirección de las partes más calientes a las partes más frías. Existen tres métodos por medio de los cuales se puede dar esta transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

2.2.1.1 Métodos de transferencia de calor [14]

► Conducción. El calor se transfiere dentro del mismo cuerpo. Para conducción de calor se utiliza la ley de Fourier que para una dimensión puede expresarse como:

$$q_{cd} = -k\frac{\partial T}{\partial x} \tag{2.4}$$

donde: q_{cd} es el flujo de calor en la dirección x
k es la conductividad térmica
$\frac{\partial T}{\partial x}$ es el gradiente de temperatura en la dirección de propagación

► Convección. En esta forma de transferencia, el calor se transfiere por movimiento relativo de porciones del cuerpo caliente. En la convección de calor se tiene la ley de Newton:

$$q_{cv} = h(T_s - T_\infty) \tag{2.5}$$

donde: h es el coeficiente de convección
T_s es la temperatura de la superficie
T_∞ es la temperatura del fluido

► Radiación. El calor se transfiere directamente entre porciones distantes del cuerpo por medio de radiación electromagnética. Para radiación de calor la ley de Stefan-Boltzman establece:

$$q_{rd} = \varepsilon\sigma_{SB}T_S^4 \tag{2.6}$$

donde: σ_{SB} es la constante de Stefan-Boltzman
T_S es la temperatura absoluta de la superficie

ε 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.

Para obtener el campo de temperatura en un medio debido a la conducción de calor se tiene que, para un cuerpo tridimensional con un volumen dV (con dimensiones en el plano cartesiano dx, dy y dz) se cumple la conservación de energía para los flujos de calor, esto es que la suma de la tasa de flujo de energía entrante al volumen dV (Q_{in}) más la energía generada dentro de este (Q_g) es igual a la suma del flujo de salida de energía (Q_{out}) y la energía almacenada en dicho volumen (Q_a):

$$Q_{in} + Q_g = Q_{out} + Q_a \tag{2.7}$$

donde:

$$Q_{in} = q_x + q_y + q_z \tag{2.8}$$

$$Q_g = \dot{g}\, dx\, dy\, dz \tag{2.9}$$

$$Q_{out} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} \tag{2.10}$$

$$Q_a = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx\, dy\, dz \tag{2.11}$$

En estas ecuaciones $\dot{g}$ es la tasa de energía generada por unidad de volumen en el medio, ρ es la densidad y c la capacidad calorífica específica

$$q_x = -kdydz \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_x \quad (2.12) \qquad q_y = -kdxdz \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_y \quad (2.13) \qquad q_z = -kdxdy \left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_z \quad (2.14)$$

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (2.15) \qquad q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (2.16) \qquad q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (2.17)$$

Por lo que la ecuación (2.7) queda:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(kdydz \frac{\partial T}{\partial x}\right)dx + \frac{\partial}{\partial y}\left(kdxdz \frac{\partial T}{\partial y}\right)dy + \frac{\partial}{\partial z}\left(kdxdy \frac{\partial T}{\partial z}\right)dz + \dot{g}dxdydz = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \tag{2.18}$$

La ecuación de difusión establece que para un punto en un medio, la tasa total de conducción de calor dentro del elemento debe ser igual a la tasa de cambio de la energía contenida en este punto. Por lo anterior, la expresión que está en forma general puede ser reducida a la forma

siguiente para el caso en que no hay generación interna de calor y la conductividad térmica del material es isotrópica.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \tag{2.19}$$

donde $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ es la difusividad térmica en (m^2s^{-1}) que es una propiedad que proporciona una medida de cómo fluye el calor dentro de un material. .

2.2.1.2 Reflexión y transmisión de ondas térmicas

Puede tenerse el concepto de onda térmica considerando un flujo de calor armónico para explicar los fenómenos de reflexión, refracción y esparcimiento en la difusión de dicho flujo.

Asumiendo el flujo de calor como la transmisión de ondas térmicas, puede tenerse una teoría con la cual se obtiene la siguiente ecuación para definir el campo de temperatura en un medio isotrópico semi infinito [14]:

$$T(x,t) = \frac{Q_0}{2\sqrt{\rho c k \omega}} \exp\left(-x\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\right) \exp j\left(\omega t - x\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} - \frac{\pi}{4}\right) \tag{2.20}$$

donde: ω es la frecuencia angular moduladora de la fuente de calor
Q_0 es la intensidad de la fuente de calor

De esta solución se tiene que para las ondas térmicas existe una dependencia oscilatoria espacial que tiene como consecuencia un parámetro llamado longitud de difusión (μ) que resulta ser análogo al "efecto skin" (profundidad de penetración) en las ondas electromagnéticas.

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \tag{2.21}$$

Las ondas térmicas pueden penetrar más en un sólido si su difusividad térmica es alta o si se tienen ondas térmicas de baja longitud. Así mismo, las ondas térmicas de baja frecuencia se propagan más lentamente que las de alta frecuencia.

Dentro de la teoría de las ondas térmicas también está el término de impedancia térmica (Z) que define la relación de la temperatura con la densidad del flujo de calor. Este parámetro determina la magnitud de la onda térmica en la superficie de la muestra.

$$Z = \frac{1}{\sqrt{j\omega\rho ck}} \tag{2.22}$$

Donde $\sqrt{\rho ck}$ es la efusividad térmica que describe la temperatura en la unión de dos cuerpos a diferente temperatura en contacto, es decir la velocidad a la cual estos cuerpos absorben y rechazan el calor.

Los coeficientes de transmisión y reflexión en una frontera térmica pueden ser derivados de la ecuación de onda térmica [14].

Para incidencia normal: $\Theta_i = \Theta_t = 0$, y los coeficientes de reflexión y transmisión:

$$R = \frac{1-b}{1+b} \quad (2.23) \qquad\qquad T = \frac{2}{1+b} \quad (2.24)$$

donde: b es el cociente de las efusividades de ambos medios

2.2.2 Obtención del campo de temperatura en el material termo-óptico [15]

Considerando que el campo de temperatura está dado por un pulso de calor en forma de escalón aplicado en la superficie del medio. La fuente de calor para x = 0 es:

$$Q_S(t) = \begin{cases} Q & para \quad t \geq 0 \\ 0 & para \quad t < 0 \end{cases} \tag{2.25}$$

Se asume que el material tiene una difusividad térmica α, conductividad térmica k y el campo de temperatura satisface la ecuación de difusión variando solamente en el eje x,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \tag{2.26}$$

El flujo de calor q en un punto del material está dado por:

$$q = -k\frac{\partial T}{\partial x} \equiv -kT_x \tag{2.27}$$

Con las condiciones de frontera:

$$T_x = (x,0) = 0 \qquad T_x(0,t) = \begin{cases} -\dfrac{Q}{k} & para \quad t \geq 0 \\ 0 & para \quad t < 0 \end{cases} \tag{2.28}$$

La solución para un medio semi-infinito de este problema es:

$$T_x(x, t \geq 0) = -\frac{Q}{k}\left[1 - erf\left(\frac{x}{2}\sqrt{\frac{1}{\alpha t}}\right)\right] \tag{2.29}$$

donde la función error complementario está definida como :

$$erf(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^S \exp(u^2)du \tag{2.30}$$

Se analiza un material termo-óptico de espesor d entre dos medios semi-infinitos como se muestra en la Figura 2.1. Se tienen las difusividades α_0, α_1, α_2 y las efusividades térmicas e_0, e_1, e_2 para los medios 0, 1 y 2 respectivamente.

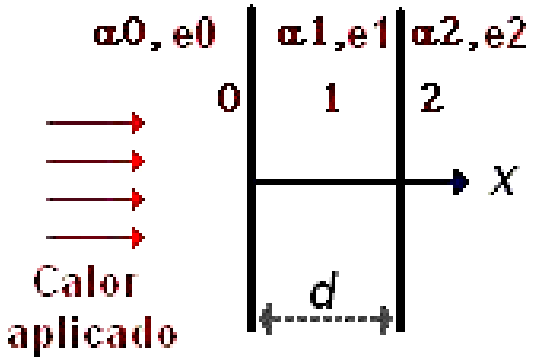


Figura 2.1 Geometría considerada

El campo de temperatura así como el flujo de calor satisfacen la ecuación de difusión a lo largo del eje x cuyo origen se colocó en la superficie del material por lo que ahora se deben satisfacer las condiciones de frontera para $x = d$.

Considerando el pulso escalón como la superposición de ondas térmicas monocromáticas donde la onda se refleja de un lado a otro de las dos interfaces, esto es en $x = 0$ y en $x = d$, los coeficientes de reflexión serían:

$$R_1 = \frac{1 - b_{10}}{1 + b_{10}} \tag{2.31} \qquad R_2 = \frac{1 - b_{12}}{1 + b_{12}} \tag{2.32}$$

donde $b_{10} = \frac{e0}{e1}$ y $b_{12} = \frac{e2}{e1}$

Debido a que este coeficiente de reflexión no depende de la frecuencia se tiene que la función de respuesta escalón se refleja sin distorsión adicional a la segunda interfase, se puede entonces escribir el campo T_x en cualquier punto del material como la superposición de todos los pulsos escalón originando una fuente de espejo localizado de izquierda a derecha en la Figura 2.1.

La primer reflexión del pulso escalón en $x = d$ genera un pulso escalón viajando a la izquierda de la figura con una amplitud $-R_2$ veces la amplitud del pulso escalón inicial (el signo negativo es debido a que el pulso viaja en dirección opuesta y la derivada espacial es de signo opuesto). Este pulso reflejado aparece como generado de un espejo localizado a $x_1^- = 2d$. Este segundo pulso es reflejado entonces a x = 0 y genera un tercer pulso viajando a la derecha con una amplitud R_2R_1 veces la amplitud inicial.

La fuente de espejo equivalente para este tercer pulso está en $x_1^+ = -2d$. De nuevo este pulso es reflejado a $x = d$, y así sucesivamente. Siguiendo este procedimiento se observa que las fuentes de espejo del lado derecho del material en la figura son: $x_n^- = 2d, 4d, 6d, \ldots$ con amplitudes $-R_2$, $-R_2$ (R_2R_1), $-R_2$ $(R_2R_1)^2, \ldots$ Las fuentes de espejo del lado izquierdo del material están a $x_n^+ = -2d, -4d, -6d, \ldots$ con amplitudes R_2R_1, $(R_2R_1)^2$, $(R_2R_1)^3, \ldots$

Sumando al pulso inicial a todos los pulsos escalón reflejados a la derecha se obtiene:

$$-\frac{Q}{k_1}\sum_{n=0}^{\infty}(R_2R_1)^n\left\{1-erf\left[\frac{(2nd+x)}{2}\right]\sqrt{\frac{1}{\alpha_1 t}}\right\} \tag{2.33}$$

Sumando todos los pulsos escalón viajando a la izquierda se tiene:

$$-\frac{Q}{k_1}R_2\sum_{n=0}^{\infty}(R_2R_1)^n\left\{1-erf\left[\frac{(2(n+1)d-x)}{2}\right]\sqrt{\frac{1}{\alpha_1 t}}\right\} \tag{2.34}$$

Considerando todas las contribuciones se tiene:

$$T_X^S(x,t) = -\frac{Q}{k_1}\sum_{n=0}^{\infty}(R_2R_1)^n\left[1-erf\left(\frac{2nd+x}{2}\sqrt{\frac{1}{\alpha_1 t}}\right)-R_2\left\{1-erf\left[\frac{(2(n+1)d-x)}{2}\right]\sqrt{\frac{1}{\alpha_1 t}}\right\}\right] \tag{2.35}$$

2.3 Principio de funcionamiento del sensor de flujo de calor

El sensado en este sistema consiste en la detección del cambio intensidad de un haz láser. Este cambio de intensidad es producto de la deflexión de un haz de luz láser al pasar por un

bloque de acrílico expuesto a una fuente de calor. El calor entregado al acrílico por parte de la fuente provoca que en este medio exista un gradiente de temperatura y por tanto un gradiente de índice de refracción. Al hacer pasar un haz de luz en este medio con diferente índice de refracción (dependiente del flujo de calor) se tiene una desviación del camino óptico del haz hacía la región más fría, es decir, la región con mayor índice de refracción. Éste principio se muestra en la Figura 2.2.

Entre las ventajas que ofrece este nuevo diseño son: menor tamaño y mayor estabilidad favoreciendo las condiciones de sensado remoto lo que es una característica necesaria en varias situaciones donde el parámetro sensado se encuentra ubicado en un lugar alejado, o bien resulta inaccesible durante la realización de algún proceso.

Esta aplicación en el sensado remoto podría llevarse a acabo mediante la implementación de un sistema de referencia en fibra óptica que ha elaborado el grupo de la Dra. Celia Sánchez Pérez en el CCADET [16]. Este sistema se basa en la reducción de ruido gracias a referenciar la señal de sensado. Es decir, se manda una señal óptica que es dividida en dos señales iguales para que una de ellas pase a un elemento sensor y luego a un detector mientras que la otra llega directamente a otro detector. Se tiene por lo tanto que la diferencia de estas señales es la medición deseada con gran reducción de ruido.

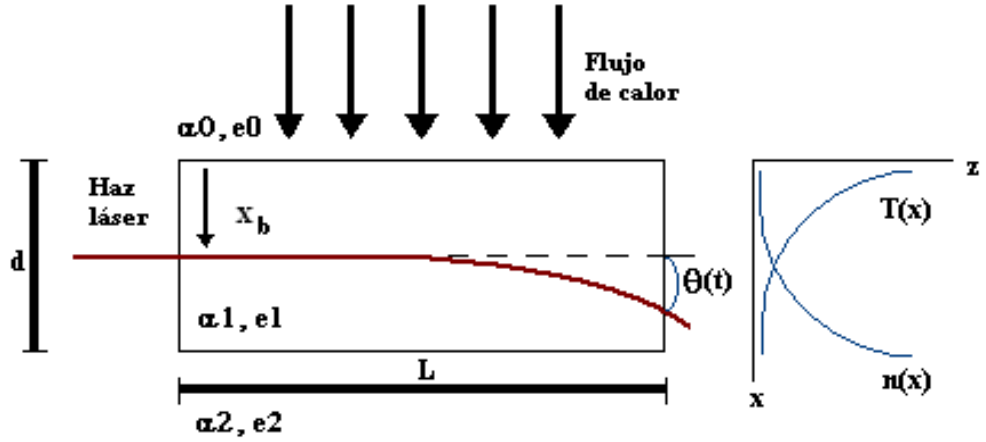


Figura 2.2 Principio del sensor de flujo de calor

Conclusiones

En éste capitulo se analizó el comportamiento termodinámico de un material al ser expuesto a una fuente de calor con lo que podemos darnos cuenta de que es posible medir el flujo de calor a través de la medición de la deflexión de un haz que atraviesa un bloque de material termo-óptico como el acrílico expuesto al calor, por lo que este principio es aplicable en un sensor.

Capítulo 3. Sensor de ángulo en fibra óptica modulado en intensidad

En este capítulo se verá por medio de la calibración de un sensor de ángulo cuánto influyen los desplazamientos lineales y angulares en el sensor de flujo de calor. El sensor analizado es un sensor extrínseco de intensidad basado en fibra óptica.

3.1 Sensores de intensidad

Un sensor es un dispositivo cuya función es la detección de algún parámetro físico (distancia, temperatura, humedad, intensidad luminosa…). Ésta detección puede llevarse a cabo por diversos medios dependiendo del parámetro que se desea obtener.

Debido a sus cualidades (miniaturización y resistencia del sensor, mediciones no destructivas y sin contacto para un amplio rango de parámetros físicos) se tiene un amplio uso de los sensores de fibra óptica modulados en intensidad, es por esto que existe un gran interés en el perfeccionamiento de los sistemas de sensado para que se tenga el menor ruido posible en las mediciones.

También se tiene la gran ventaja de la inmunidad a la interferencia eléctrica que simplifica la conexión entre el sensor y el sistema de detección y resulta de gran importancia para automatización en fábricas.

A diferencia de los sensores de fase en fibra óptica donde para la transmisión a lo largo de una fibra de 1 km existe una variación de fase aleatoria mayor a los 10^5 radianes, el ruido ambiental en la transmisión por intensidad a lo largo de una fibra es aproximadamente menor a 1dB por km. Continuando la comparación entre estos tipos de sensores se tiene que la detección de fase tiene que hacerse por medio de referencias para que pueda existir una interferencia necesitando por lo mismo de interferómetros teniendo que construirse sensores en fibra óptica monomodal de alta sensibilidad mientras que los sensores de intensidad en fibra óptica pueden llegar a construirse en fibra multimodal [17].

3.1.1 Tipos de sensores de intensidad

Los sensores de intensidad en fibra óptica se clasifican en extrínsecos e intrínsecos dependiendo del mecanismo de modulación de intensidad.

Sensores extrínsecos o híbridos. Utilizan partes ópticas complementarias por lo que en este tipo de estructuras híbridas la fibra óptica se utiliza generalmente solo para propósitos de transmisión.

Sensores intrínsecos o de efecto interno. En estos sensores la manipulación mecánica de la fibra conlleva la modulación de la luz.

Sensores extrínsecos

"Fiberdyne" Utilizan los efectos por manipulaciones mecánicas en fibras multimodales para sensar flujo y efectos acústicos.

Sensores de microcurvaturas. Utilizan el efecto de pérdidas por microcurvaturas en la fibra para realizar el sensado de presión, temperatura, peso, proximidad, flujo y efectos acústicos.

Sensores intrínsecos

Sensores de válvulas de luz. Utilizan la medición de la luz reflejada o transmitida para sensar nivel de líquidos, proximidad, presión, desplazamientos, temperatura, flujos y efectos acústicos.

Sensores de esparcimiento. Con este tipo de sensores se busca determinar flujos y tamaños de partículas, utilizan el cambio de intensidad o cambio en la frecuencia Doppler.

Sensores de espectro. Son utilizados para la determinación de temperatura, presión, voltaje y composición química.

3.1.2 Características de los sensores

Los sensores, como todo instrumento de medición, tiene parámetros que caracterizan su funcionamiento con la finalidad de saber en que aplicaciones su uso resulta adecuado. Algunos de estos parámetros son:

Exactitud. Indica que tan cercano es el valor medido por el sensor con respecto a la verdadera señal del mensurado. La obtención de esta característica puede ser encontrada mediante la comparación con un modelo teórico.

Precisión. Es la forma con la cual podemos saber que tanta repetibilidad tiene el sensor, es decir, que tanto reproduce las mediciones.

Sensibilidad. Es la relación de la salida del sensor con respecto a cambios de la cantidad a ser medida.

Resolución. Se refiere al cambio mínimo del mensurado al que puede responder el sensor.

Rango dinámico. Es el rango del mensurado sobre el cual es válido el valor de la sensibilidad de la medición.

3.2 Principio de funcionamiento del sensor de ángulo

En el diseño propuesto para el sensado de flujo de calor se tiene un bloque de material termo-óptico expuesto a calor. El gradiente de índice de refracción debido al flujo de calor en un material termo óptico provoca una deflexión angular, sin embargo existe también un desplazamiento lateral que puede comprenderse más fácilmente al ver la Figura 3.1, donde cada ΔL va acumulando este desplazamiento.

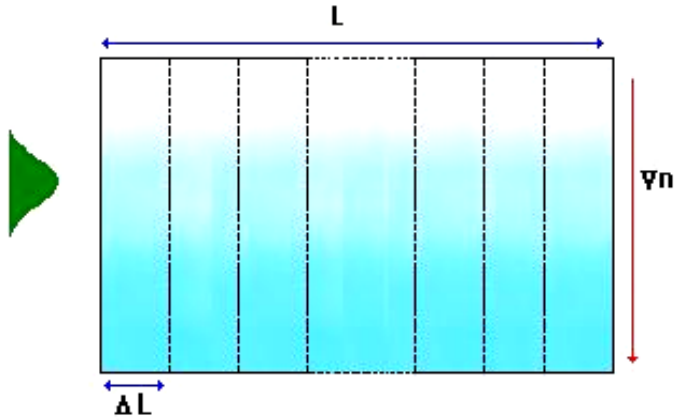


Figura 3.1 Diferencial de longitud

El sensor de ángulo que se presenta tiene la estructura que se muestra en la Figura 3.2. Se comienza con una fuente láser que es la señal aplicada al sistema, la fibra óptica servirá solo como guía de onda. Siguen los colimadores con el fin de recobrar la mayor parte de la intensidad del haz en el fotodetector. Se realizará un giro por parte de uno de los colimadores provocando que la intensidad recibida en el otro colimador disminuya (en caso de que al principio se ajustara la colimación a fin de tener el máximo de la señal).

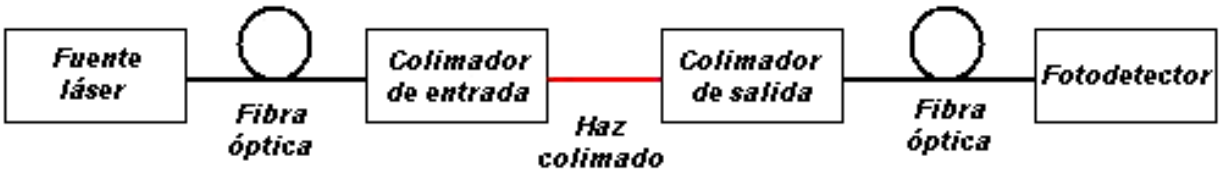


Figura 3.2 Diagrama del sensor de ángulo

Al realizar el cambio de ángulo en el primer colimador se tiene un haz de rayos paralelos (debido a la colimación) que deja de ser perpendicular al siguiente colimador debido al giro. Este ángulo provoca que el haz no se enfoque sobre el eje original de la señal pero sigue estando en el plano focal de la lente mostrando un desplazamiento con respecto al centro como se puede ver en la Figura 3.3. Como resultado de este desplazamiento en ángulo se tiene un

cambio de intensidad recibida en el colimador de salida que ocasiona cambios en la respuesta del fotodetector.

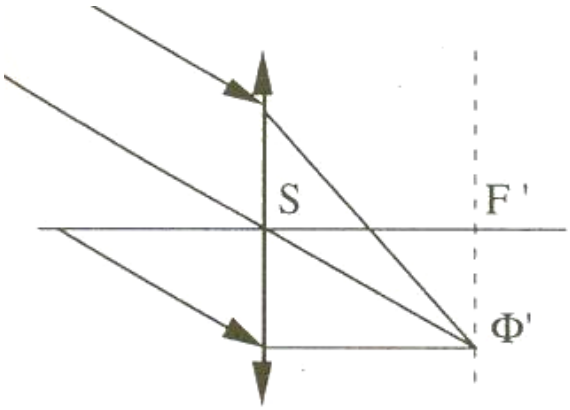


Figura 3.3 Transmisión de un haz colimado no perpendicular a una lente delgada

La potencia de la salida para el sensor de ángulo se calcula a través de la integral de recubrimiento del haz gaussiano en dos dimensiones (X-Y) con el área del núcleo de la fibra monomodal al que enfoca el colimador de salida (Figura 3.4). Donde *r* es el radio del núcleo de la fibra monomodal.

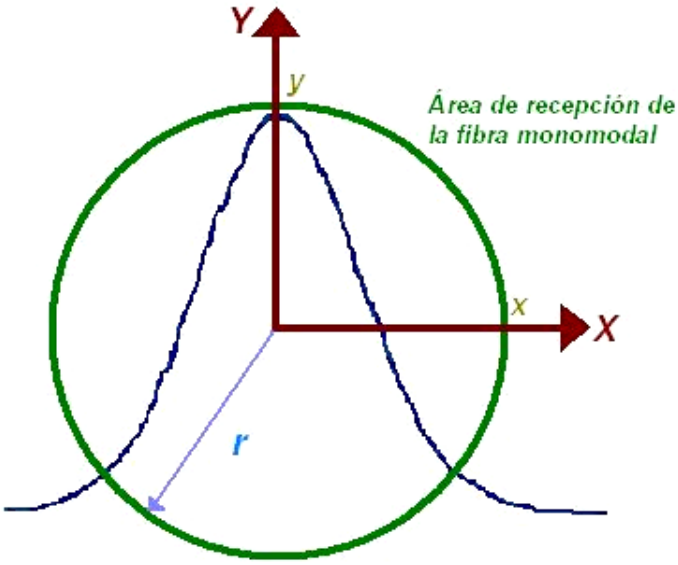


Figura 3.4 Perfil gaussiano proyectado sobre el núcleo de la fibra.

La expresión para la potencia de salida (P_{out}), considerando que el haz gaussiano se desplaza un corrimiento lineal *h* con respecto al origen como consecuencia de la foto deflexión como se muestra en la Figura 3.5, está en función de la intensidad del haz de la forma la siguiente:

$$P_{out} = \iint_A I(x,y,h)dxdy \tag{3.1}$$

Así, si desarrollamos la integral de área nos queda:

$$P_{out} = \int_{-r}^{r} \int_{-\sqrt{r^2-x^2}}^{\sqrt{r^2-x^2}} I_0 e^{\frac{-(x-h)^2+y^2}{\omega_I^2}} dxdy \tag{3.2}$$

haz gaussiano
recorrido un h

En donde ω_I es el diámetro del haz gaussiano para el modo fundamental.

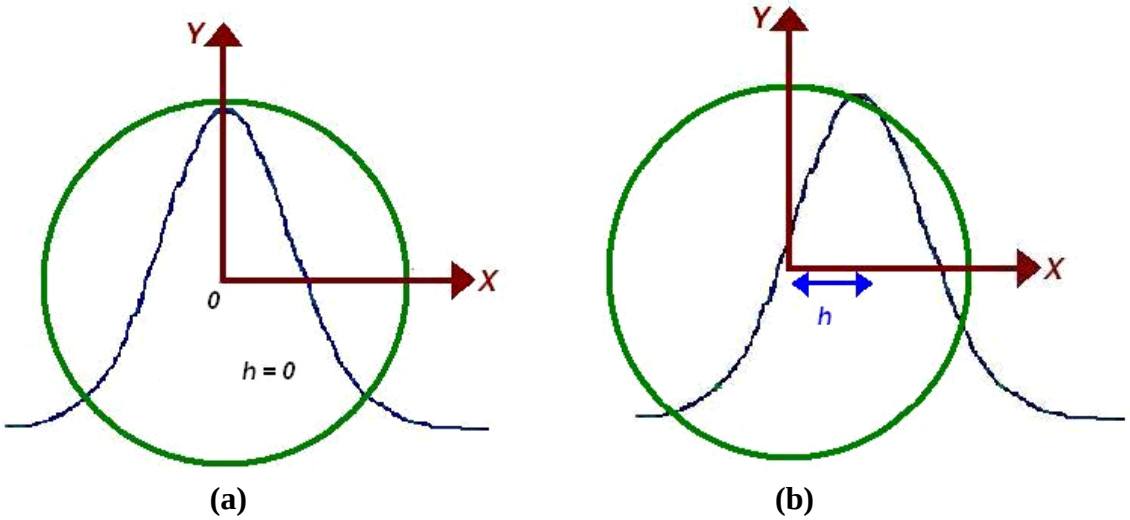


Figura 3.5 Perfil gaussiano proyectado sobre el núcleo de la fibra. (a) Sin desplazamiento. (b) El haz se desplaza una distancia h

Siendo que la función en la coordenada Y es simétrica (ya que no hay corrimiento en esta coordenada dado que el calor solo es aplicado en X), podemos rescribir los límites como:

$$P_{out} = \int_{-r}^{r} 2 \int_{0}^{\sqrt{r^2-x^2}} I_0 e^{\frac{-(x-h)^2+y^2}{\omega_I^2}} dxdy \tag{3.3}$$

$$P_{out} = 2I_0 \int_{-r}^{r} \left(e^{\frac{-(x-h)^2}{\omega_I^2}} \int_{0}^{\sqrt{r^2-x^2}} e^{\frac{-y^2}{\omega_I^2}} dy \right) dx \tag{3.4}$$

Con el cambio de variable $t = \frac{y}{\omega}$; $dy = \omega dt$; $y^2 = t^2\omega^2$, y recordando la función error complementario definida en la ecuación (2.30) se obtiene:

$$\int_0^{\sqrt{r^2-x^2}} e^{\frac{-y^2}{\omega_I^2}} dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \int_0^{\sqrt{r^2-x^2}} \frac{2\omega_I}{\sqrt{\pi}} e^{-t^2} dt = \frac{\omega_I \sqrt{\pi}}{2} erf\sqrt{r^2 - x^2} \tag{3.5}$$

$$P_{out} = 2I_0 \int_{-r}^{r} \left(e^{\frac{-(x-h)^2}{\omega_I^2}} \left(\frac{\omega_I \sqrt{\pi}}{2} erf\sqrt{r^2 - x^2} \right) \right) dx \tag{3.6}$$

$$P_{out} = I_0 \omega_I \sqrt{\pi} \int_{-r}^{r} \left(e^{\frac{-(x-h)^2}{\omega_I^2}} erf\sqrt{r^2 - x^2} \right) dx \tag{3.7}$$

Para saber el diámetro ω_I del haz gaussiano del modo fundamental de una fibra monomodal Corning SMF 28 con un diámetro del campo eléctrico ω_e:

$$\omega_I = \frac{\omega_e}{\sqrt{2}} \tag{3.8}$$

Con las expresiones anteriores hemos podido encontrar la potencia de salida en función del desplazamiento lineal que ocurre en la fibra debido a un cambio de ángulo del haz.

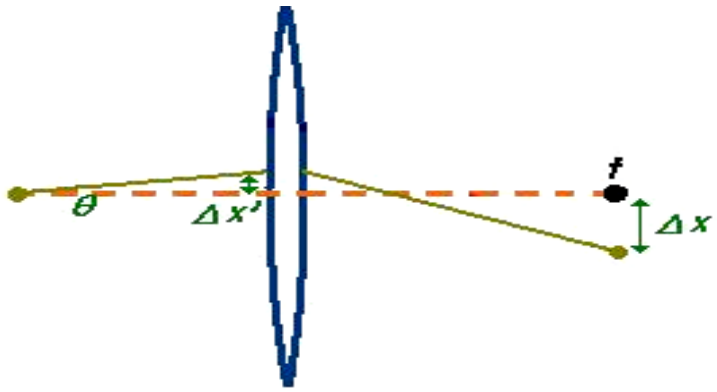


Figura 3.6 Desplazamiento lineal en el plano focal debido a un cambio de ángulo

Recordando que el haz gaussiano no pierde su forma después de pasar por una lente delgada[9] y que la imagen se proyecta a una distancia focal debido a que se trata de un haz colimado como se muestra en la Figura 3.6, es posible obtener el ángulo que provoca estos

desplazamientos mediante la expresión $\Delta x = \theta * f$ en donde θ es el ángulo que se desplaza el haz, f es la distancia focal y Δx es el desplazamiento en el núcleo de la fibra óptica.

3.3 Implementación del sensor de ángulo

El sistema armado se muestra en la Figura 3.7 donde pueden observarse cinco grados de libertad para el movimiento entre los colimadores.

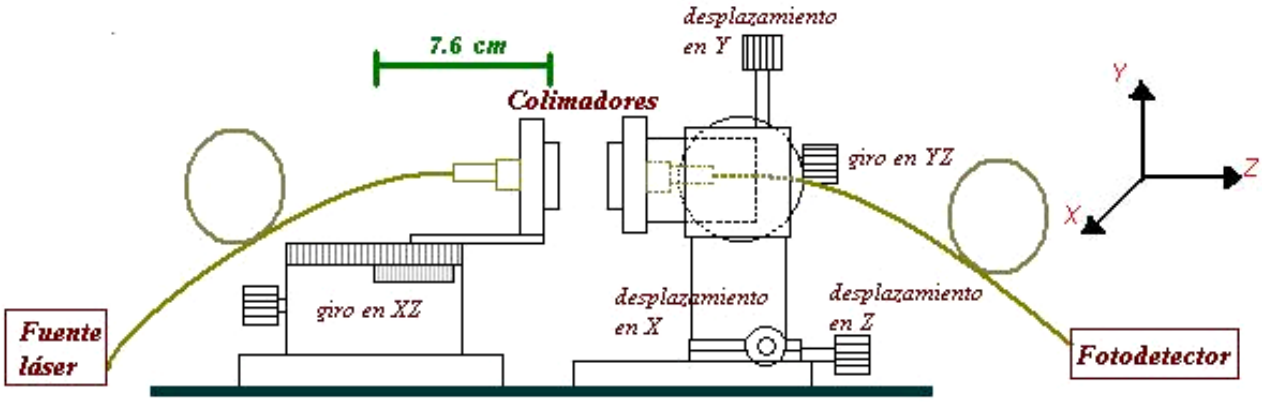


Figura 3.7 Sistema para calibración del sensor de ángulo

El primer elemento en este arreglo es la Fuente láser que suministra la señal al sistema y está conectorizado a una fibra óptica que llega a uno de los colimadores. Este primer colimador se encuentra montado en una placa sujeta a una platina giratoria graduada que permite el movimiento en el plano XZ, el eje de giro para este colimador es de 7.6 cm.

El colimador de salida se encuentra montado en una placa sujeta a otra platina giratoria que permite el giro en el plano YZ. Esta platina giratoria se encuentra unida a una platina lineal que proporciona el ajuste en el eje Y. Este arreglo se encuentra unido por medio de un sujetador a otro par de platinas una de las cuales permite el movimiento en el eje X mientras la otra lo permite en el eje Z.

El haz viaja del colimador de salida al fotodetector por medio de otro tramo de fibra óptica

A continuación se mencionan las características de los elementos requeridos en la implementación este sistema.

Fuente láser LPS-1550-FC

Utiliza un diodo láser ML976H6F de InGaAsP con emisión en 1550 nm de la marca Mitsubishi conectorizado a una fibra óptica monomodal Corning SMF 28.

Algunas características del diodo láser son:

- Baja corriente de umbral de 10 mA (máximo 20 mA)
- Baja corriente de operación de 30 mA
- Ancho de banda de emisión de 1520 nm a 1580 nm

Esta fuente fue utilizada con corrientes de alimentación entre los 15 y 17.5 mA para los cuales se tiene una potencia de 0.28 a 0.45 mW. La salida del láser para este intervalo de valores se muestra en la Figura 3.8.

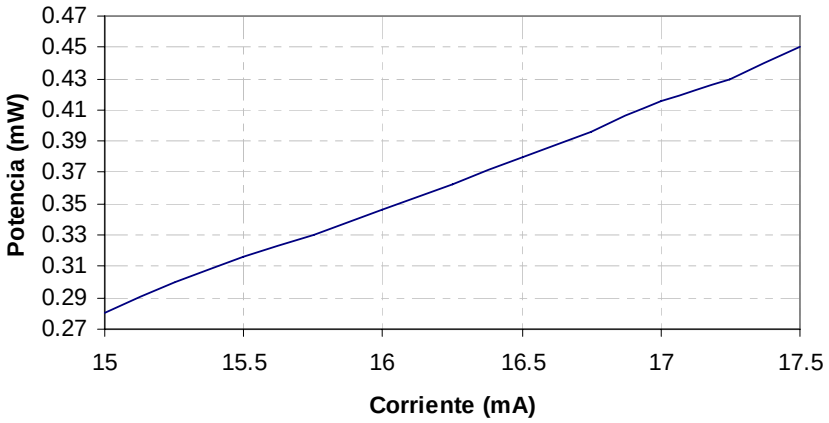


Figura 3.8 Curva de respuesta de la fuente láser.

Para lograr el control de la corriente del diodo láser se utilizó un circuito limitador. Este circuito es el mostrado en la Figura 3.9

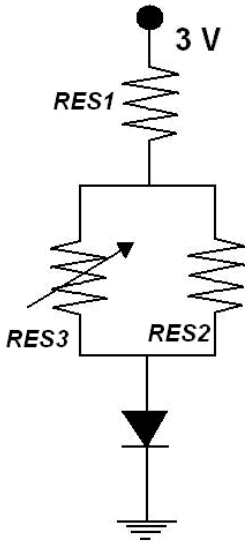


Figura 3.9 Circuito limitador de corriente de la fuente láser

Cálculo de los componentes del circuito

Para Iop_{max} =40 mA y Vop =1.1V:

$$\frac{V - Vop}{RES1} = Iop_{\max} \tag{3.9}$$

$$RES1 = \frac{3-1.1}{40}\frac{V}{mA} = 47.5\Omega$$

Para Iop_{min} =10 mA y Vop =1.1V:

$$\frac{V - Vop}{RES1 + RESeq} = Iop_{\min} \tag{3.10}$$

$$RESeq = \frac{3-1.1}{10}\frac{V}{mA} - 47.5\Omega = 142.5\Omega$$

Considerando RES3 = 5 KΩ

$$RES2 = \frac{RES3 \cdot RESeq}{RES3 - RESeq} = \frac{5000 \cdot 142.5}{5000 - 142.5}\frac{\Omega^2}{\Omega} = 146.68\Omega \tag{3.11}$$

Por lo que se utilizaron los valores comerciales de RES1 = 47 Ω, RES2 = 150 Ω y RES3 un trimpot de 5 KΩ con lo que obtiene una variación de 9.07 a 27.9 mA.

Colimadores F230FC-C de la marca ThorLabs

La distancia focal es de 4.5 mm, tiene un diámetro del haz para una distancia focal de los lentes de 0.8 mm y su ángulo total de divergencia es 0.118º.

Uno de los colimadores fue montado sobre una platina giratoria con resolución de un minuto de arco para calibrar el comportamiento para un desplazamiento angular del sistema. El otro colimador fue montado sobre un arreglo con una platina giratoria sin graduación y tres platinas lineales de microposicionamiento con resolución de 0.02 mm. Una de estas platinas fue la que se utilizó para medir el desplazamiento lineal mientras que los otros elementos fueron utilizados para alinear el sistema.

En la Figura 3.10 se puede ver una fotografía de la vista superior del sensor de ángulo en la que se aprecia la ubicación de los colimadores.

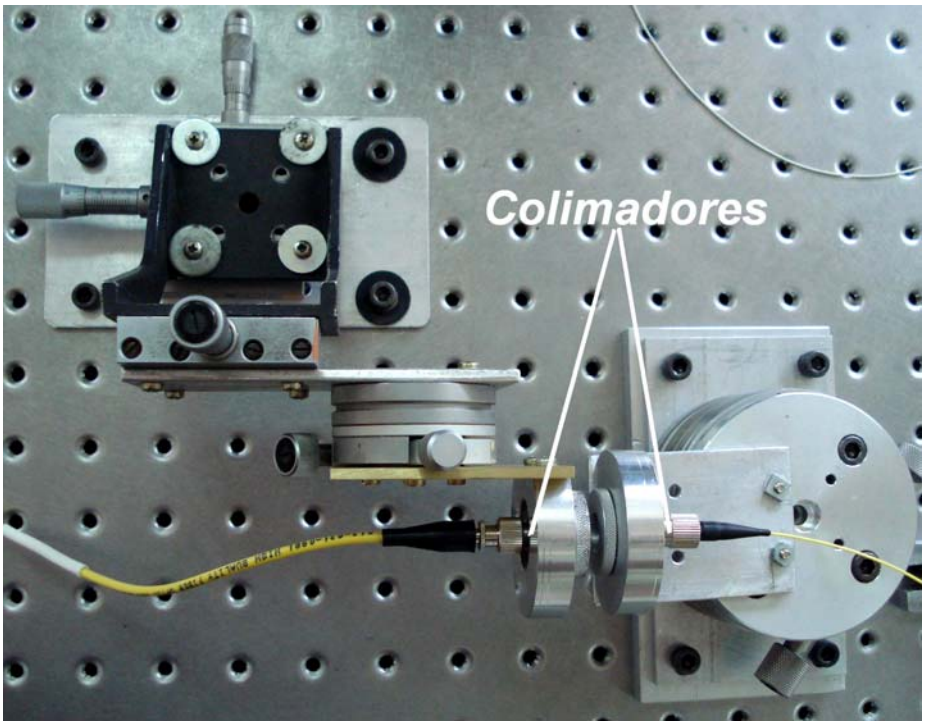


Figura 3.10 Vista superior del sensor de ángulo

Detección de la señal

La primera etapa del sistema de medición es un transductor que, tratándose de un sistema de medición óptico, fue implementada mediante el uso de un fotodetector. El fotodetector empleado en el sistema es un fotodetector NT55-757 de la marca Edmund Optics. Este detector cuenta con un diámetro de 120 µm del área de sensado y una responsividad de 0.95 A/W trabajando con una longitud de onda de 1550 nm.

Como la mayoría de los transductores requieren de etapas de acondicionamiento, principalmente de amplificación, para esto, lo primero que se implementó fue una etapa de acoplamiento de la señal de salida del transductor con la señal de entrada garantizando que la mayor parte de la señal se mantuviera en las etapas posteriores ya que la señal se puede perder o atenuar debido al cambio de impedancias.

El acoplamiento de impedancias se logró mediante un amplificador operacional. Este circuito integrado puede ser empleado como acoplador de impedancias, ya que debido a sus características de entrada con impedancia muy grande (de MΩ) y salida con impedancia muy pequeña (50 Ω), es ideal para que una señal pueda ser acoplada al no conocerse sus parámetros eléctricos o al ser una señal extremadamente pequeña, como la que se está midiendo de un fotosensor. El amplificador operacional fue empleado en una configuración de seguidor. Debido a que no hay amplificación no se requieren de cálculos para esta etapa de sensado.

Como la señal entregada por el fotodiodo es muy pequeña fue necesaria una etapa de amplificación en el acondicionamiento de la señal de salida

Para el circuito diseñado, se utilizó un amplificador operacional *TL082*, el cual consta en un solo circuito integrado con dos amplificadores operacionales, lo cual nos fue de mayor utilidad, ya que con éste circuito se logró realizar la etapa de acoplamiento de impedancias y de preamplificación con un solo circuito integrado y en un solo circuito impreso. La etapa de amplificación fue una configuración de amplificador no inversor. El esquema y cálculos de la etapa de preamplificación se muestran en la Figura 3.11.

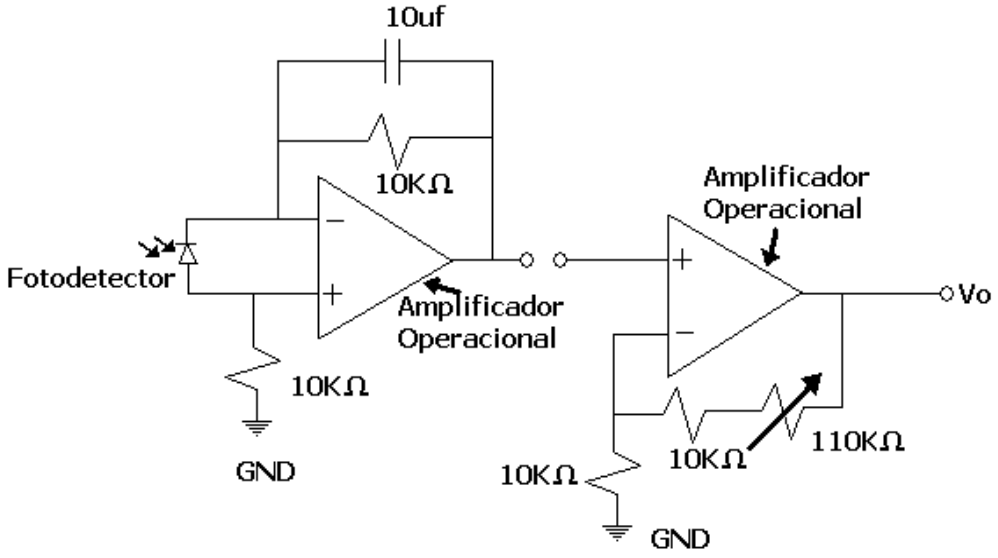


Figura 3.11 Circuito electrónico de amplificación en los fotodetectores

<u>Cálculo de ganancia de la etapa de amplificación:</u>

$$Ganancia = (1+ RESB/RESA) \tag{3.12}$$

Donde: $RESA = 10\ K\Omega;\ \ RESB=10\ K\Omega+110\ K\Omega = 120\ K\Omega$

Por lo tanto:

$Ganancia = (1+120K\Omega/10K\Omega) = 13$

Adquisición de datos

La parte de comunicación con la computadora para la adquisición de datos fue realizada con un multímetro Agilent 34401A de 6 ½ digitos de resolución. Este multímetro fue conectado a la salida Vo del circuito detector para que los datos fueran llevados directamente a un archivo de Excel.

3.4 Resultados

Con el fin poder tomar niveles de referencia en el arreglo del sensor de flujo de calor se calibró el sensor de ángulo, para lo cual se analizó la respuesta eléctrica en el fotodetector proveniente del cambio de intensidad recibida debido a la diferencia del ángulo de incidencia del haz entre dos colimadores. También se llevaron a cabo pruebas de desplazamiento lateral de uno de los colimadores obteniendo el perfil del haz, con esto se puede tener además una estimación del "efecto navaja" en la fibra óptica conectada al colimador. Este efecto provoca el truncamiento de la señal debido a que parte del haz no es recibido por la fibra debido a su área receptora. De esta forma la variación del ángulo del sistema también proporciona una estimación del "efecto navaja" pero esta vez debido al área receptora de los colimadores.

Para la medición de desplazamiento se posicionó la platina del eje X a fin de tener en la señal de salida lo correspondiente a un extremo del haz gaussiano. A partir de ahí se tomaron lecturas de voltaje a la salida para desplazamientos de 0.02 mm, con lo que se realizó la gráfica de la Figura 3.12.

En esta gráfica se puede observar claramente el perfil gaussiano del haz de luz que viaja por la fibra, la gráfica se realizó a partir de varias mediciones, teniendo una desviación estándar máxima de $sd_{máx} = \pm 0.4877$ V.

En el presente capítulo así como en los posteriores se tienen valores de desviaciones estándar en el análisis de resultados para valores de los monitoreos repetidos. Este parámetro fue obtenido con el programa Origin que realiza el cálculo mediante la expresión siguiente:

$$sd = \sqrt{\text{var}} \tag{3.13}$$

$$\text{var} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2 \tag{3.14}$$

donde n es el número de muestras y $\overline{X}$ es la media de las lecturas tomadas.

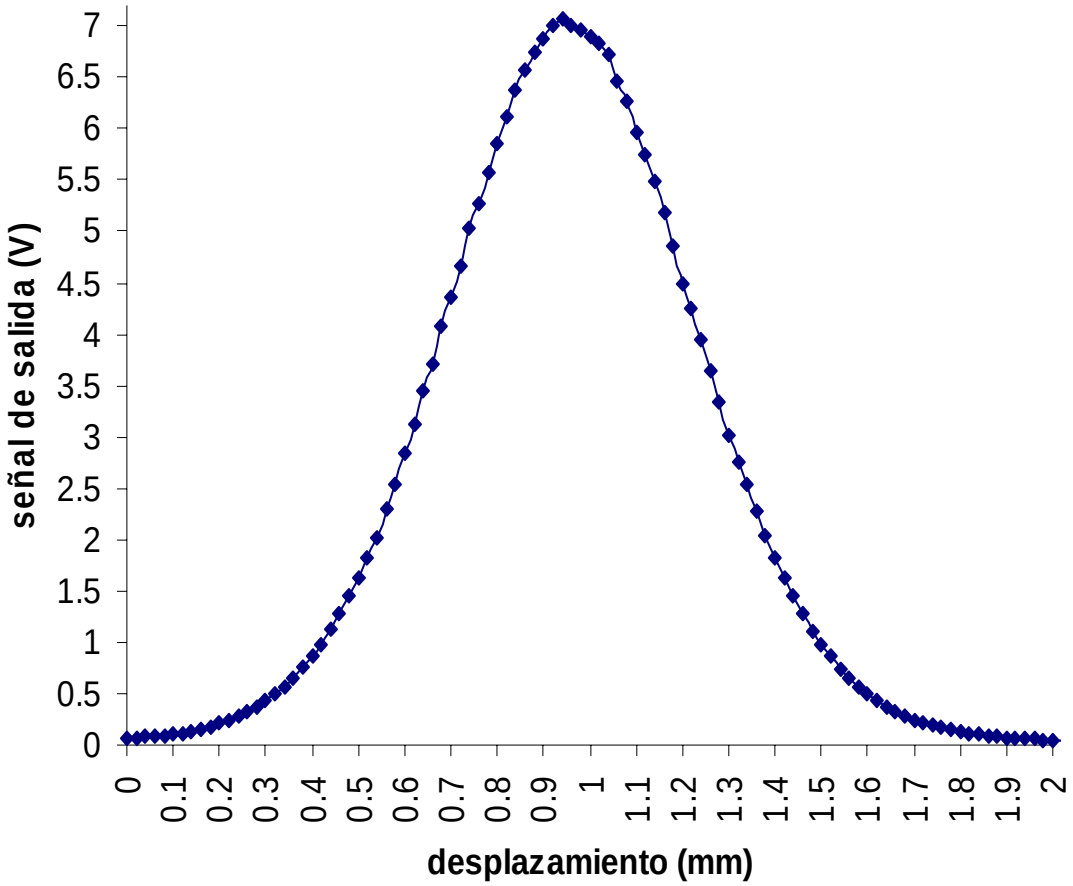


Figura 3.12 Respuesta del sensor para un desplazamiento lineal en la coordenada X en el colimador de salida.

Se hizo una aproximación lineal para los valores comprendidos entre aproximadamente 1.5 V y 6.5 V que corresponden a los desplazamientos entre 0.48 mm a 0.86 mm para la pendiente positiva y de 1.06 mm a 1.44 mm de desplazamiento para la pendiente negativa.

La resolución de las mediciones fue de 10^{-4} V para la señal de salida y de 20 μm para el desplazamiento lineal del colimador.

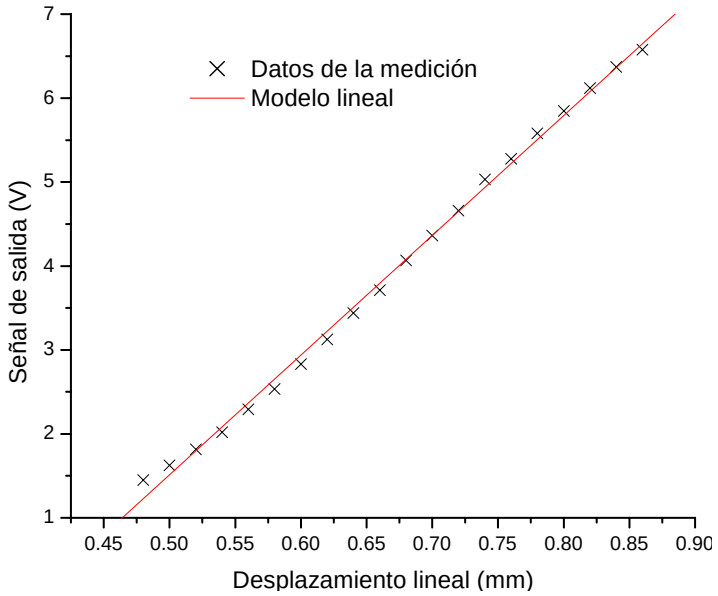


Figura 3.13 Linealización de la señal de salida del sensor para un desplazamiento lineal de 0.48 mm a 0.86 mm

En la Figura 3.13 se puede ver la aproximación lineal de la parte con pendiente positiva de 14.2652 V/mm que es la sensibilidad del sistema para esta intervalo de valores obtenida de manera experimental. Para saber que tanto se aproxima a una línea recta se obtuvo un coeficiente de correlación lineal de R = 0.99865 con una con una desviación estándar de sd = ± 0.09004 V.

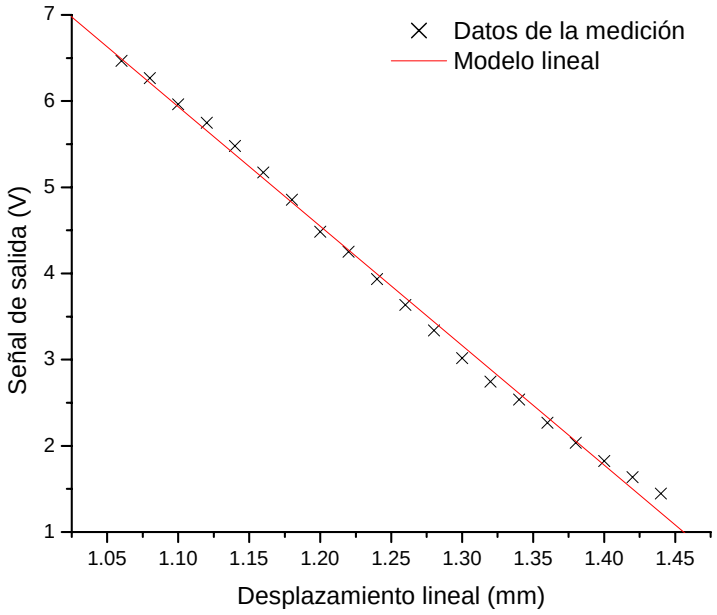


Figura 3.14 Linealización de la señal de salida del sensor para un desplazamiento lineal de 1.06 mm a 1.44 mm.

En la Figura 3.14 se puede ver la aproximación lineal de la parte con pendiente negativa de -13.8602 V/mm que es la sensibilidad del sistema para esta intervalo de valores obtenida de manera experimental. Se obtuvo también su coeficiente de correlación lineal siendo de R = 0.9983 con una con una desviación estándar de sd = ± 0.0985 V.

El programa Origin calcula los parámetros de la regresión lineal $Y_i = A + BX_i$ de la siguiente manera:

$$A = \overline{Y} - B\overline{X} \tag{3.15}$$

$$B = \frac{\sum_i^N (X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})}{\sum_i^N (X_i - \overline{X})^2} \tag{3.16}$$

$$sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - (A + Bx_i))^2}{N-2}} \tag{3.17}$$

Para el desplazamiento angular se posicionó igualmente el haz a fin de obtener la respuesta de voltaje de un extremo del perfil de la señal gaussiana para "barrer" toda la forma. Las lecturas tomadas se muestran en la Figura 3.15; para esta gráfica se anexó una línea de tendencia con aproximación a una forma de onda gaussiana que se realizó utilizando Origin. Esta aproximación presenta un coeficiente de determinación $R^2 = 0.98214$.

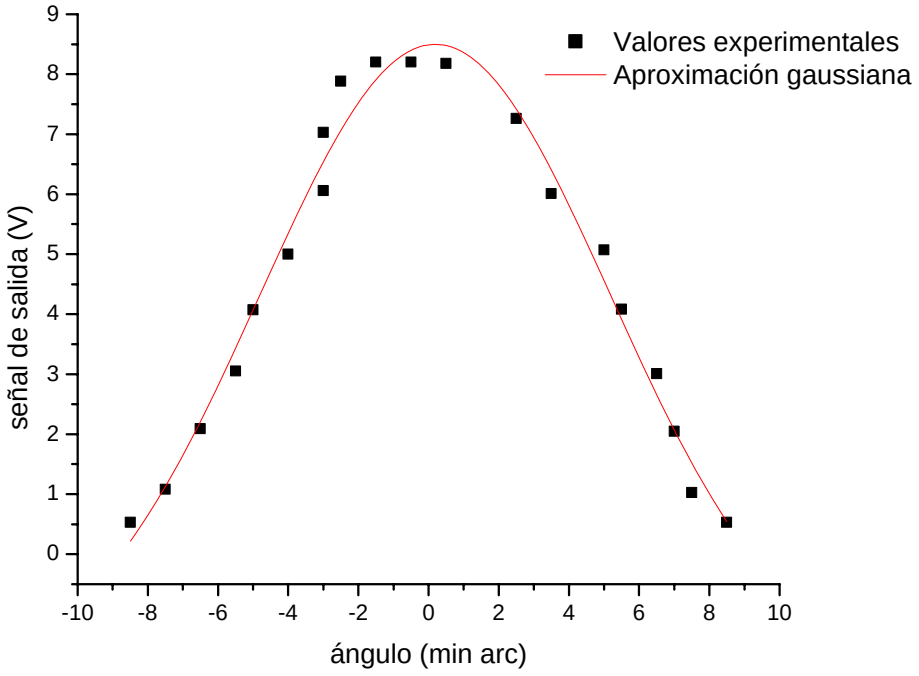


Figura 3.15 Respuesta del sensor para un desplazamiento angular en el plano XY

En este caso no se pudo obtener tan fácilmente una comparación entre mediciones debido a la dificultad de obtener valores exactos con la resolución de un minuto de arco ya que el arreglo experimental era muy sensible a cambios de ángulo.

En esta Figura 3.15 se puede ver un intervalo angular de 17 min arc para la obtención de casi la totalidad de la forma del haz. Se analizó también la pendiente de cada lado para encontrar su sensibilidad.

Los tramos analizados fueron para los valores comprendidos entre aproximadamente 1 V y 7 V que corresponden a los desplazamientos angulares entre 1 min arc a 5.5 min arc para la pendiente positiva y de 11 min arc a 16 min arc de desplazamiento para la pendiente negativa.

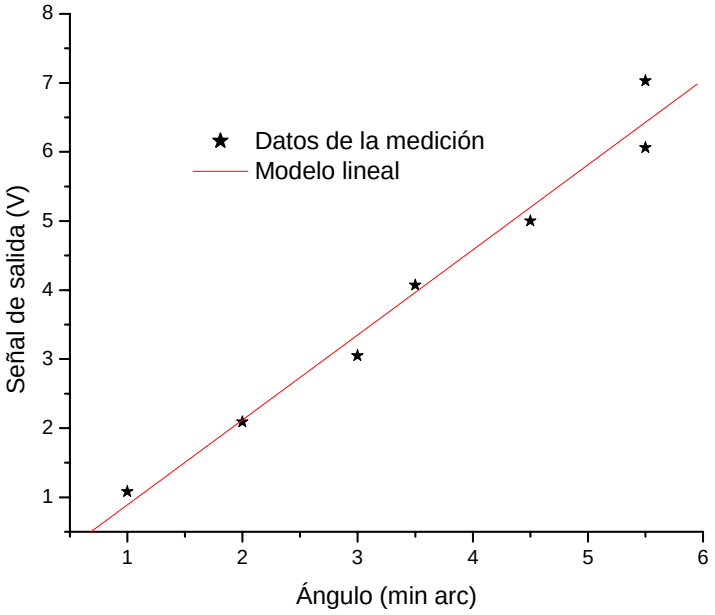


Figura 3.16 Linealización de la señal de salida del sensor para un desplazamiento angular de 1 min arc a 5.5 min arc

Para la gráfica de la Figura 3.16 se puede ver la aproximación lineal de la parte con pendiente positiva de 1.2302 V/min.arc. Se obtuvo también su coeficiente de correlación lineal siendo de R = 0.98764 con una con una desviación estándar de sd = ± 0.3675 V.

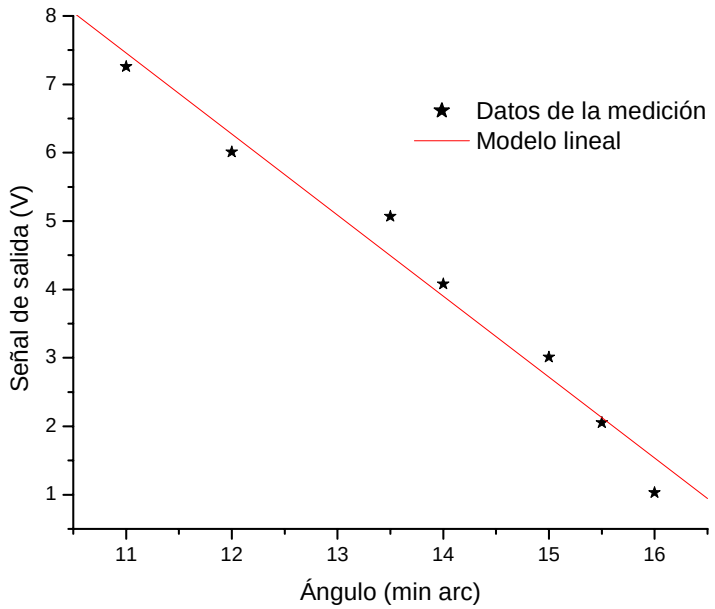


Figura 3.17 Linealización de la señal de salida del sensor para un desplazamiento angular de 11 min arc a 16 min arc.

Para la Figura 3.17 se puede ver la aproximación lineal de la parte con pendiente negativa de -1.1847 V/min.arc. Se obtuvo también su coeficiente de correlación lineal siendo de R = 0.98606 con una con una desviación estándar de sd = ± 0.4034 V.

Recordando el principio de funcionamiento del sensor de flujo de calor mostrado en la Figura 2.2 se puede hacer una aproximación de la deflexión del haz Δx para los resultados obtenidos. Para esto se muestra en la Figura 3.18 donde θ es el ángulo de deflexión, L la longitud del acrílico, d la longitud en la que se reflecta el haz y Δx la deflexión del haz a la salida del bloque. El valor real de Δx se obtiene utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta x = d \tan\theta \tag{3.18}$$

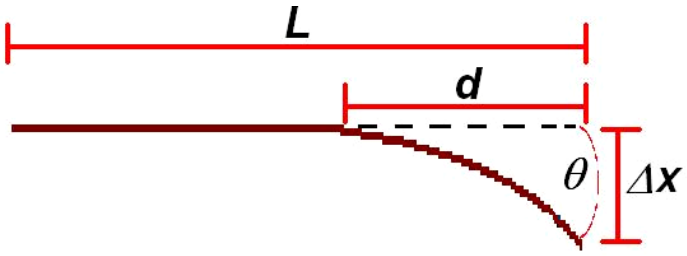


Figura 3.18 Desplazamiento del haz en la fotodeflexión

Aproximando mediante la longitud del bloque de acrílico llegamos a la ecuación 3.19 que por tratarse de ángulos muy pequeños se puede manejar como se muestra en la ecuación 3.20

$$\Delta x = L \tan\theta \tag{3.19}$$

$$\Delta x = L\theta \tag{3.20}$$

De estos resultados podemos tener una estimación del tipo de mecanismo más sensible en este arreglo. Como se verá en el capítulo 4, el bloque de acrílico utilizado tiene una longitud L = 2.8 cm. De la Figura 3.14 se puede ver que al alinear los colimadores una deflexión provocaría un desplazamiento angular máximo de 9 min arc, con éste dato y la longitud L se puede encontrar que la deflexión máxima estimada es de 0.073 mm que equivaldrían aproximadamente a un cambio de 0.2V en la salida como se ve en la Figura 3.11.

Tomando esto en cuenta podemos concluir que el desplazamiento lineal que se pudiera tener no resulta tan significativo como el desplazamiento angular por lo que puede ser despreciado en los análisis.

Considerando ahora que para la fibra óptica Corning SMF 28 se tiene un diámetro del campo modal de 10.4 ± 0.8 μm para una longitud de onda de 1550 nm, se realizó la comparación de los resultados con el modelo que obtiene la función de transmitancia del sensor de ángulo (ecuación3.7), ésta comparación se muestra en la Figura 3.19. La respuesta teórica fue obtenida programando la función de transferencia en Matlab.

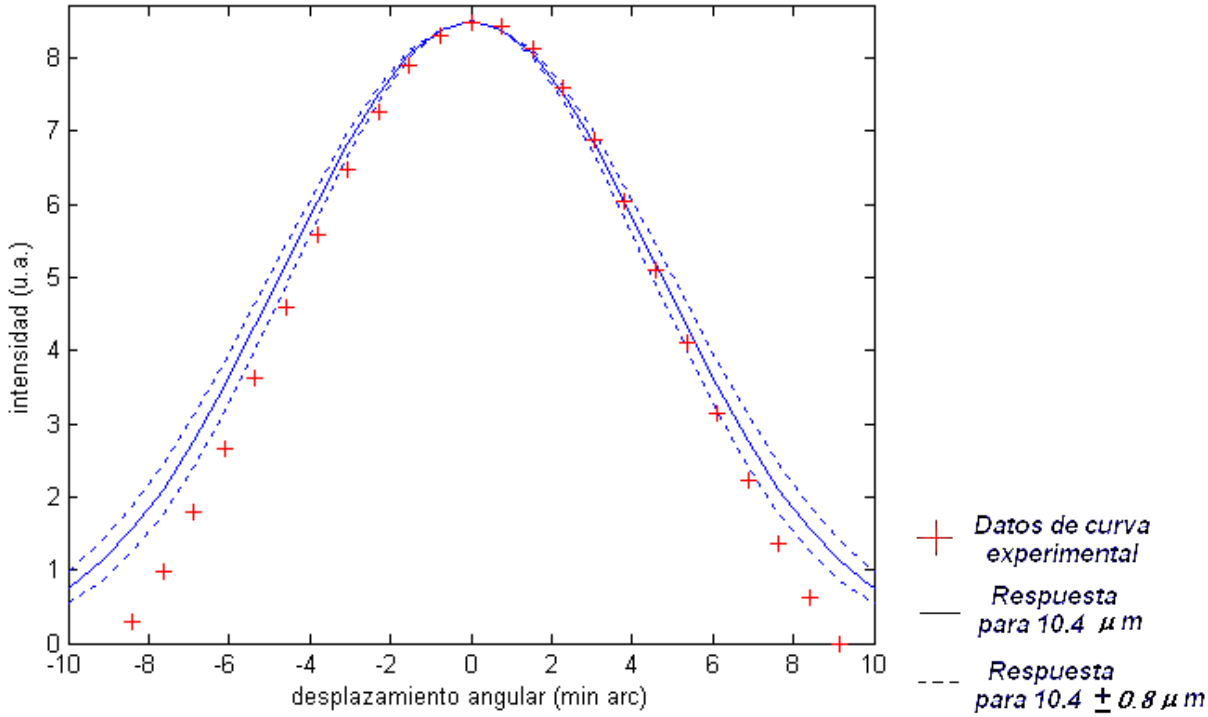


Figura 3.19 Comparación de la curva experimental con la curva teórica

La línea continua en ésta gráfica representa la respuesta obtenida con el programa antes mencionado para el valor medio del diámetro del campo modal, es decir para 10.4 μm. La gráfica en línea punteada exterior a esta muestra la respuesta para un valor de 11.2 μm mientras que la interior a la línea continua representa la respuesta obtenida para el valor de 9.6 μm de diámetro del campo modal.

Las marcas de una cruz (+) son los valores de la curva de tendencia de Origin (aproximación gaussiana).

En la gráfica de la Figura 3.19 podemos observar como la curva obtenida de los datos experimentales se ajusta mejor a la curva teórica cuando ésta es referente al mínimo valor del diámetro del campo en la fibra, es decir para 9.6 μm y se van distanciando conforme éste aumenta. Aún así es posible ver que la curva experimental se aproxima bastante a la curva teórica obtenida.

Conclusiones

Con este sensor de ángulo realizado mediante dos colimadores es posible medir ángulos con una sensibilidad de 1.2302 V/min.arc por lo que se concluye que es posible aplicarlo a la medición de la deflexión de ángulo que se utilizará en el sensor de flujo de calor.

También se comprobó que el análisis puede efectuarse considerando únicamente el cambio angular del haz al sufrir la deflexión ya que el desplazamiento lineal no es considerable.

Capítulo 4. Diseño del sensor de flujo de calor

El sensor de flujo de calor diseñado en esta tesis está basado en el cambio de intensidad recibida en un detector debido a la deflexión de un haz de luz cuando este viaja a través de un material termo-óptico expuesto a una fuente de calor.

El arreglo cuenta con soporte mecánico de precisión para los colimadores con el cual logramos tener una adecuada alineación que permite la recuperación de la mayor cantidad posible de potencia óptica del haz. Con estos colimadores alineados lo que tenemos es un sensor de ángulo debido a que el haz será desviado de su trayectoria y la intensidad recibida en los detectores variará en función del ángulo de desviación teniendo el máximo de intensidad cuando la trayectoria es recta (no existe fuente de calor que excite el sistema).

4.1 Implementación del sensor de flujo de calor

El arreglo experimental se muestra en la Figura 4.1 donde cabe mencionar que para obtener la deflexión únicamente debida al calor aplicado las caras del material termo-óptico deben estar perfectamente paralelas a los colimadores para evitar pérdidas por reflexión. Para esto el acrílico se encontraba montado sobre un elemento fijado al *U bench* que mediante cuatro tornillos de ajuste permitía posicionar las caras del bloque perpendicularmente a los colimadores mediante movimientos en el plano XZ.

El bloque de acrílico fue pulido en las caras de entrada y de salida con discos de hasta 0.3 μm para que fueran los más paralelas posibles y poder evitar las pérdidas antes mencionadas.

En la Figura 4.1 (a) se puede ver los componentes del sistema. La señal es emitida por una fuente láser y guiada a través de fibra óptica monomodal al colimador de entrada del *U Bench.* El bloque de acrílico se encuentra montado en la base que tiene los tornillos de ajuste el cual se encuentra fijado al *U Bench*. De esta manera la señal será transmitida por el bloque de acrílico hasta llegar después al colimador de salida que se encuentra conectorizado a la fibra óptica monomodal que guía la señal al fotodetector.

En la Figura 4.1 (b) se ve más claramente la posición de la lámpara que se utilizó como fuente de calor así como el dispositivo de control de corriente que permite variar el calor entregado.

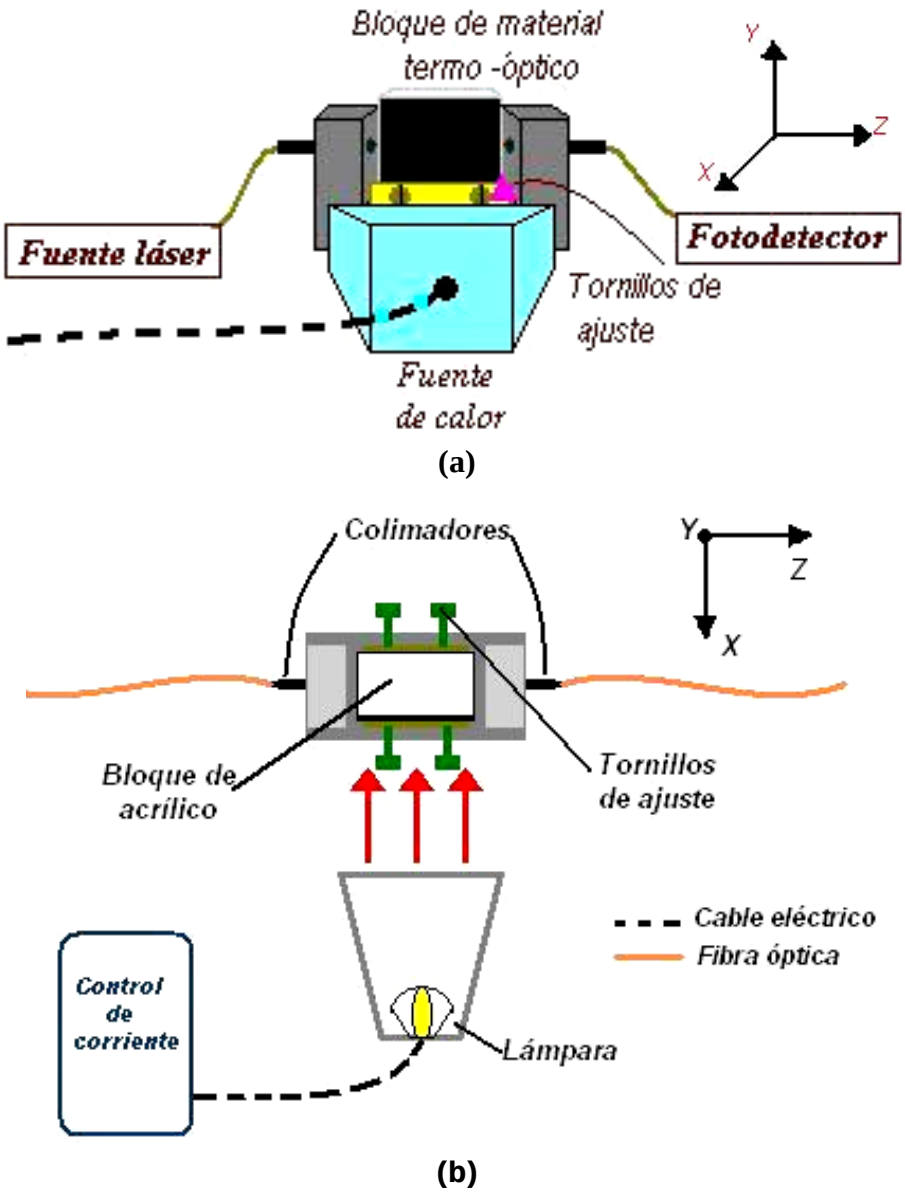


Figura 4.1 Componentes del sensor de flujo de calor. (a) Vista frontal. (b) Vista superior

La fuente láser así como la etapa de detección en este sistema son la misma que se utilizaron en el sensor de ángulo por lo que sus características pueden verse en la sección 3.3 del capítulo anterior. Las características de los colimadores así como del material termo-óptico y la fuente de calor utilizados en la implementación del sensor de flujo de calor se muestran a continuación. Cabe señalar que los colimadores para este sistema están integrados en un dispositivo que nos servía a la vez de montaje, éste es el *U Bench*.

Fiber U Bench

Para tener asegurada la máxima recuperación del haz se utilizó un *U bench* de la marca Thorlabs para obtener una colimación estable en las fibras, este dispositivo se muestra en la Figura 4.2. Las características del *U Bench* son:

- Diámetro del haz de aproximadamente 0.5mm.
- Rango de temperatura de operación de -20 a 60 ºC
- Distancia de 30 mm entre los colimadores.
- Pérdidas de inserción entre 0.5 y 1 dB
- Ancho de banda menor a los 40 nm

Tiene dos terminales de 1 m de fibra óptica Corning SMF 28. Esta fibra es manufacturada con el proceso OVD que produce una fibra sintética ultra pura y presenta una atenuación inducida ≤ 0.05 dB/km debido a la temperatura en un rango de -60 a 80 ºC cuando trabaja a 1550 nm.

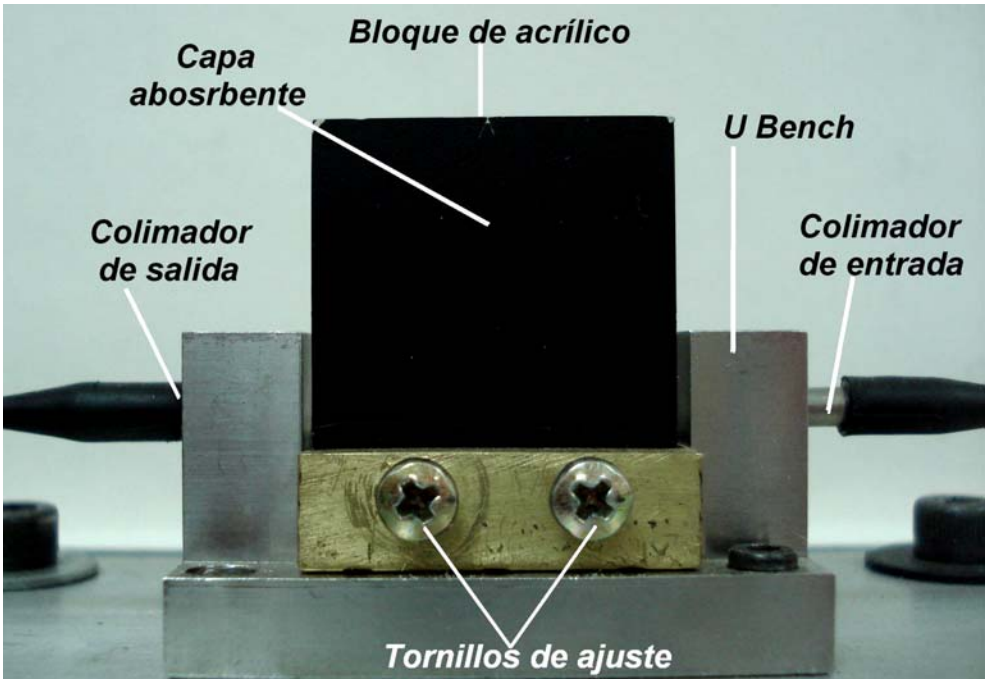


Figura 4.2 Fotografía del bloque de material termo óptico en el *U bench*

Fuente de calor

Es una lámpara que utiliza un foco de 50 W con control para ajuste de potencia; la potencia entregada fue medida con un medidor de termopila Melles Griot 13PEM001 calibrada de 200 nm a 20 µm que cuenta con un filtro óptico de banda ancha (400 nm – 2 µm) para eliminar la radiación térmica de fondo. El detector fue colocado a una distancia de 3.4 cm dado que en

arreglo experimental ésta es la distancia a la cual se colocó el sensor y fueron realizadas las mediciones con el filtro espectral activado y desactivado obteniendo las gráficas que se muestran en la Figura 4.3 y la Figura 4.4.

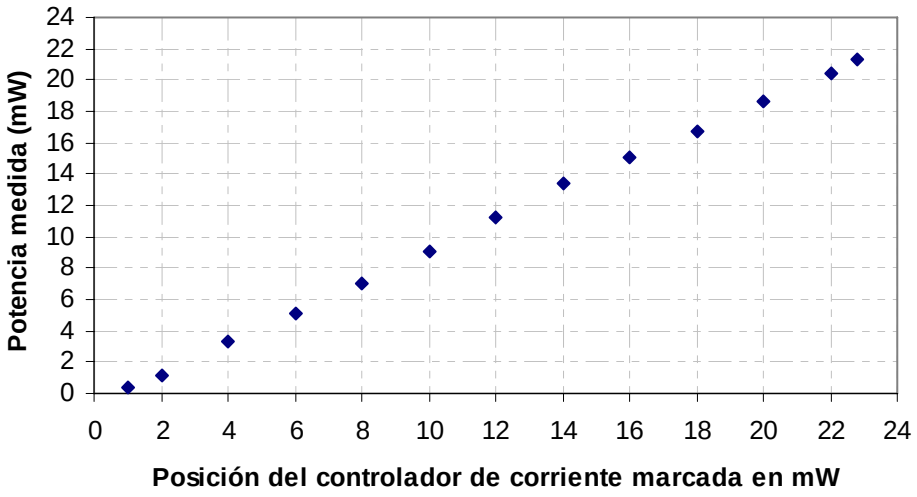


Figura 4.3 Potencia de la lámpara en función de la posición del control de corriente

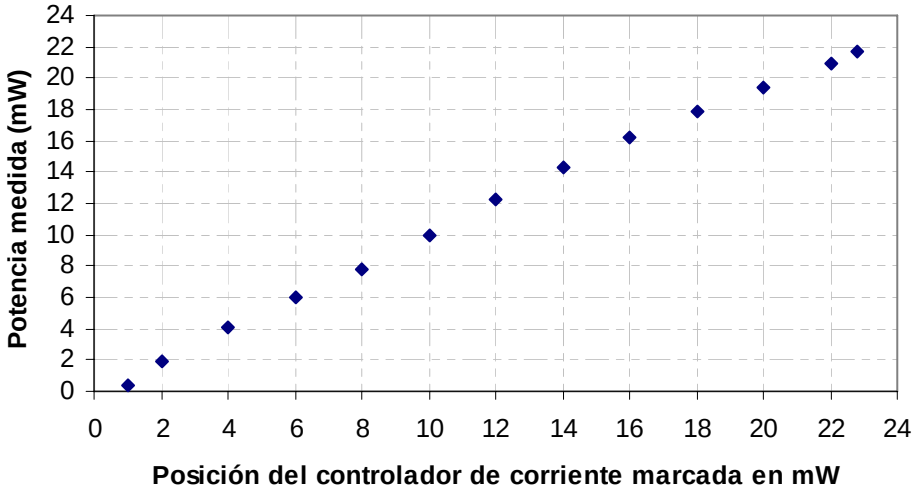


Figura 4.4 Potencia de la lámpara en función de la posición del control de corriente utilizando el filtro espectral

De las Figuras 4.3 y 4.4 se puede ver que la posición en el control de corriente de la lámpara fue calibrado utilizando el filtro espectral del medidor. Dado que las lecturas obtenidas con el medidor de energía se referían a un valor de potencia se obtuvo el valor equivalente de flujo de calor considerando el área de la termopila que corresponde a un círculo con diámetro de 10 mm, ésta equivalencia se muestra en la Tabla 4.1:

Posición del control de corriente marcada en mW	Flujo de calor aplicado (W/cm^2)
8	0.102
10	0.127
12	0.153
14	0.178
16	0.204
18	0.229
20	0.255
22	0.280

Tabla 4.1 Equivalencia de flujo de calor

Teniendo estos datos se podrá caracterizar el sensor propuesto a valores determinados de flujo de calor que le sean aplicados utilizando esta lámpara como fuente de calor.

Bloque de material termo-óptico

Se trata de un bloque de acrílico transparente de 2.8 x 1.8 x 3.1 cm con una de las caras de 2.8 x 3.1 cm cubierta con una película de pintura negra que absorbe la luzde la lámpara produciendo calor en el acrílico. Esta cara es la que se expuso a la fuente de calor.

Se utilizó acrílico debido a que tiene un dn/dT alto, siendo éste mayor al del vidrio.

Algunas características del acrílico son [13]:

- Coeficiente de expansión térmica lineal $\alpha = 6.8 \times 10^{-5}\ K^{-1}$
- Índice de refracción $n = 1.493$
- $dn/dT = -1.18 \times 10^{-4}\ K^{-1}$
- Conductividad térmica $k = 1.88 \times 10^{-3}\ W\ cm^{-1}\ K^{-1}$
- Capacidad calorífica $Cp = 1.47\ J\ g^{-1}\ K^{-1}$
- Densidad $\rho = 1.19\ g\ cm^{-3}$

Con estas características y considerando que el flujo de calor se propaga solo en la dirección del eje X se ve que la ecuación (2.3) puede expresarse como:

$$\theta = \frac{1}{n}\frac{dn}{dt}\int \nabla T(x,t)dz \tag{4.1}$$

$$\theta = \frac{L}{n}\frac{dn}{dt}\frac{dT}{dx} \tag{4.2}$$

Para la deflexión de 9 min arc mostrada en el capítulo 3 se tiene un $\frac{dT}{dx} = 1.183 \frac{^{o}C}{mm}$ en el material.

4.2 Resultados de medición de flujo de calor

Para este arreglo, el bloque de acrílico se colocó a una distancia de 3.4 cm. de la lámpara, posteriormente se ajusto la posición del bloque para obtener el máximo de transmitancia de la señal. La posición del bloque de acrílico era modificada para el plano XZ mediante el ajuste de los cuatro tornillos de la montura en la cual se encontraba por lo que se buscaba el punto de referencia al apretar o aflojar cada uno de estos tornillos

4.2.1 Prueba de repetibilidad

En ésta prueba se llevaron a cabo varias mediciones con la fuente de calor a 0.255 W/cm^2 para poder tener una mejor estimación de la repetibilidad del sistema. Para este valor de flujo de calor se realizaron cinco mediciones que se muestran en la Figura 4.5 realizadas bajo las mismas condiciones.

En estas pruebas, la fuente de calor fue encendida a los 150 segundos y apagada a los 560 segundos. A pesar de que cada prueba terminó a los 1200 segundos, se dejó un periodo de recuperación para que la señal regresara al nivel del punto de referencia para poder realizar la siguiente medición.

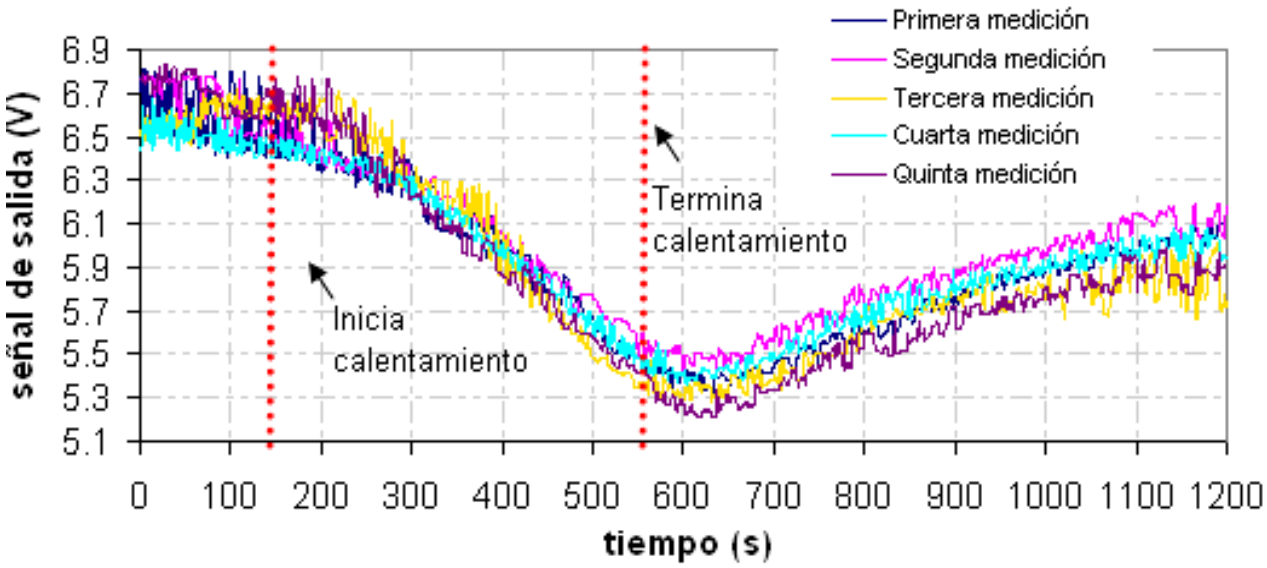


Figura 4.5 Gráfica de repetibilidad para la fuente de calor a 0.255 W/cm^2

El punto de inicio de la mediación se fijo al punto de referencia siendo éste de 6.6 V ± 0.1 V y se tiene un cambio en voltaje de 1.25 V al aplicarle el pulso de calor, éste cambio en el voltaje se empieza a ver aproximadamente 50 s. después de que se aplica el pulso de calor. También se ve que la señal comienza a recuperarse aproximadamente 80 s. después de apagada la fuente de calor.

De estos resultados puede concluirse que la respuesta del sistema está en concordancia con la aplicación de calor. Se puede ver claramente en ésta gráfica que el sistema tiene buena repetibilidad donde los datos presentan una desviación estándar de sd = ± 0.211V.

4.2.2 Medición de ruido en el sistema

El ruido es un factor importante que influye en que la desviación estándar en los resultados de las pruebas realizadas no sea más bajo. Por tanto, las causas de que las mediciones se alejan de un valor medio son probablemente el ruido mecánico y electrónico, lo que llevó a realizar un monitoreo de estas señales.

El ruido electrónico se debe a los circuitos detectores y para cuantificarlo se realizó un monitoreo de 300 segundos del sistema sin aplicación de calor ni bloque de material termo-óptico. Este monitoreo se muestra en la Figura 4.6 donde puede verse que la variación en la señal de salida es muy pequeña teniendo una amplitud de 0.02 V, sin embargo se aprecia un cambio de nivel de 1 x 10^{-2} V que puede ser debido a las pilas utilizadas como fuente de alimentación del diodo láser.

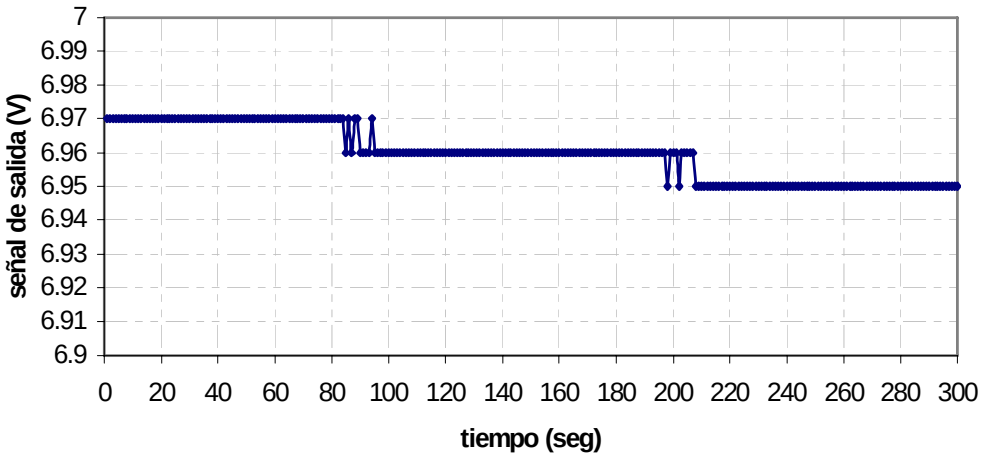


Figura 4.6 Gráfica de la salida sin bloque de acrílico y sin fuente de calor

El ruido mecánico se presenta posiblemente debido a que el bloque de acrílico no queda absolutamente fijo en el montaje. Para su análisis se realizó un monitoreo al sistema sin aplicación de flujo de calor pero con el bloque de acrílico incorporado. Este resultado puede

verse en la Figura 4.7 teniendo en este caso una variación en la amplitud de 0.16 V tomando el valor pico a pico de la señal.

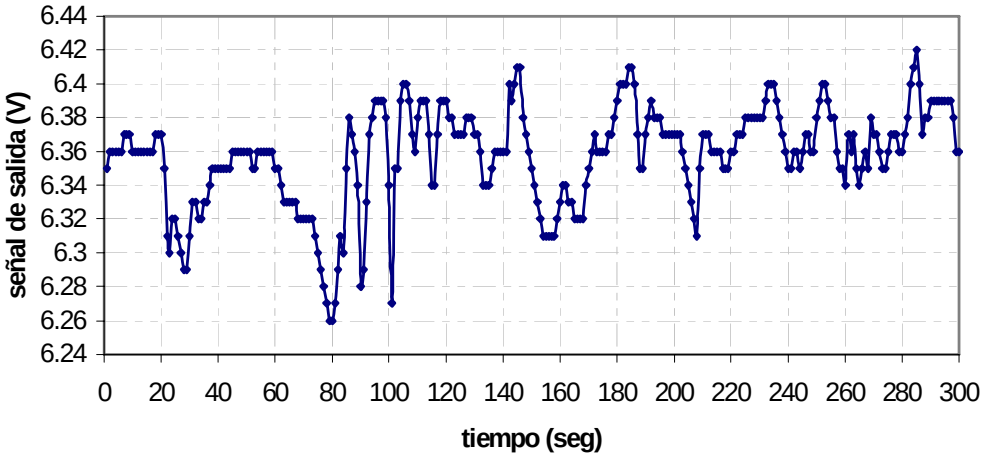


Figura 4.7 Monitoreo de la señal de salida incorporando el bloque de acrílico y sin fuente de calor

El ruido eléctrico podría disminuirse cambiando la alimentación de la fuente láser por reguladores de voltaje mientras que un sistema de posicionamiento del acrílico más adecuado contribuiría a reducir el ruido mecánico del sistema.

4.2.3 Prueba de reversibilidad

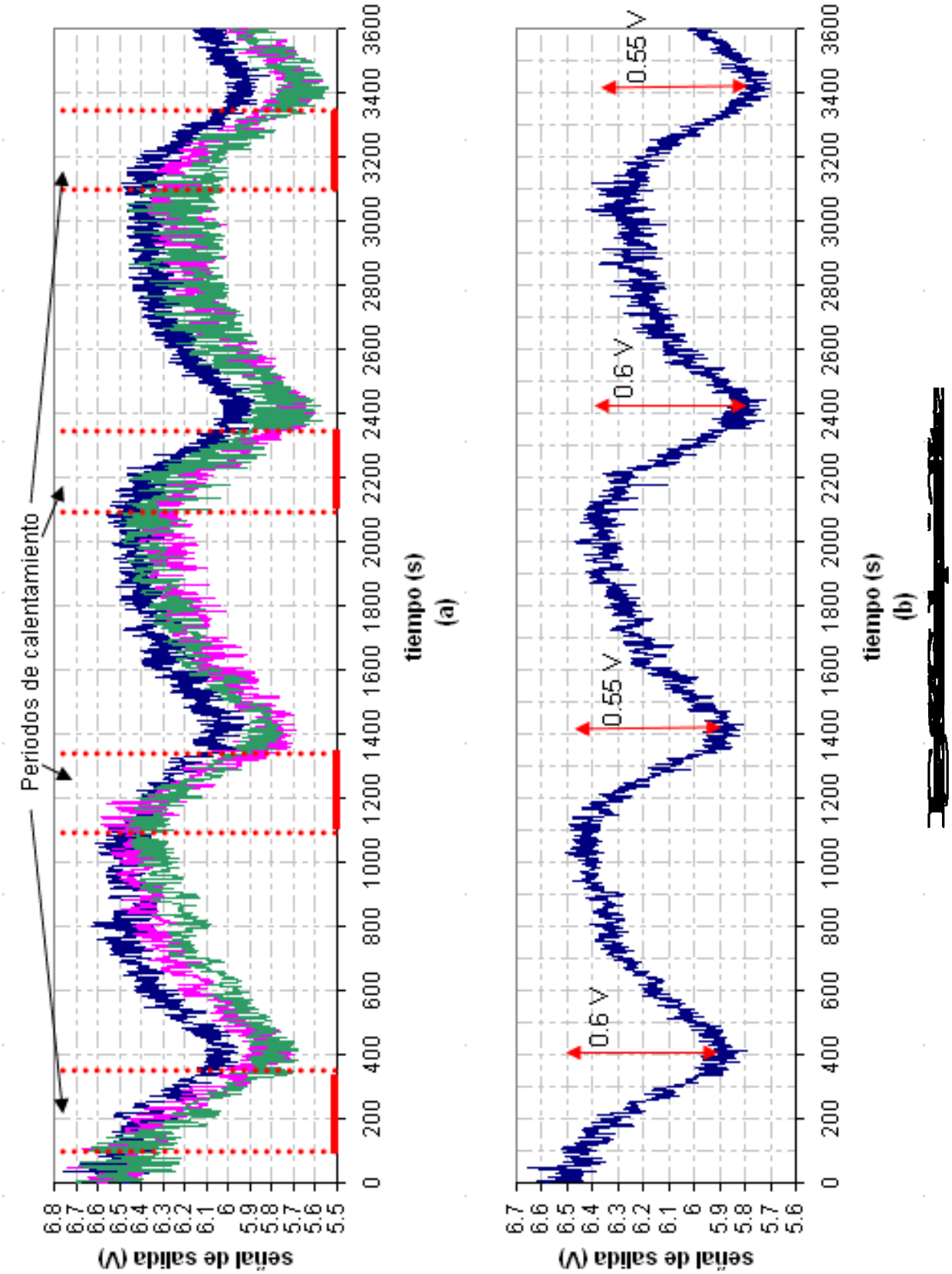
Con el fin de verificar la recuperación de la señal de salida a su punto de partida correspondiente al punto de referencia, se realizó también una prueba en la que se analiza la respuesta del sistema a pulsos consecutivos de calor.

Esta prueba consiste en la aplicación de cuatro pulsos de calor a 0.178 W/cm^2 en el lapso de una hora. Este experimento se repitió tres veces para mostrar su reproducibilidad y se procuró que antes de comenzar una nueva medición se ajustara la potencia del haz a fin de obtener el mismo nivel de referencia para las tres lecturas.

La Figura 4.8 muestra los resultados de estos experimentos donde se señala el intervalo de tiempo en el cual era aplicado el tren de pulsos de calor al sistema. Esto es, el primer pulso fue aplicado entre los 100 y 350 segundos, el segundo pulso se aplicó a los 1100 segundos también con una duración de 250 segundos, el tercero y cuarto pulsos fueron aplicados de los 2100 a 2350 segundos y de los 3100 a los 3350 segundos respectivamente. Debido a la tardanza en el enfriamiento por tratarse de un sistema termodinámico, fue necesario utilizar un ventilador para que el sistema regresara a un nivel estable, esta corriente de aire de enfriamiento era aplicada por la parte superior del sistema inmediatamente después de apagar la fuente de calor y se quitaba al llegar a un punto estable en la señal.

Los resultados muestran una desviación estándar de sd = ± 0.268 V entre las tres lecturas. Y una variación de voltaje de 0.575 ± 0.029 V como repuesta a los pulsos de calor aplicados.

No se alcanzan los mismos niveles de voltaje después de los lapsos de enfriamiento debido posiblemente al deterioro de las baterías como factor principal, no se considera otro tipo de variaciones que pudieran afectar las mediciones ya que el laboratorio donde se realizaron las mediciones no sufre de cambios notables de temperatura además de que al volver a aplicar calor al sistema ya se tenía un nivel estable en la salida (nivel que oscilaba entre un cierto valor debido al ruido) por lo que se asume que el sistema llegaba a un equilibrio térmico. Otro factor que nos indica que el sistema regresó a su condición original en el que se recibe la amplitud máxima del haz gaussiano es que la caída en cada intervalo es aproximadamente la misma.


Periodos de calentamiento
señal de salida (V)
tiempo (s)
(a)
0.6 V
0.55 V
0.6 V
0.55 V
señal de salida (V)
tiempo (s)
(b)

4.2.4 Calibración instrumental y análisis de resultados

A partir de los resultados anteriores se procedió a efectuar mediciones para calibrar el sistema, esto es, conocer la respuesta del sensor medida como cambio de intensidad en función del calor aplicado.

Se realizaron varias mediciones con el sensor para valores de flujo de calor comprendidos en el rango de 0.102 W/cm^2 a 0.280 W/cm^2. Para esto se hacía variar la potencia entregada por la lámpara incandescente repitiéndose el experimento tres veces para cada valor con el fin de promediar los resultados y disminuir así la influencia del ruido en las mediciones. Las Figuras 4.9(b) , 4.10(b) y 4.11(b) muestran el valor promedio obtenido de las repeticiones y muestran una desviación estándar de ± 0.202 V, ± 0. 221 V y ± 0.236 V respectivamente.

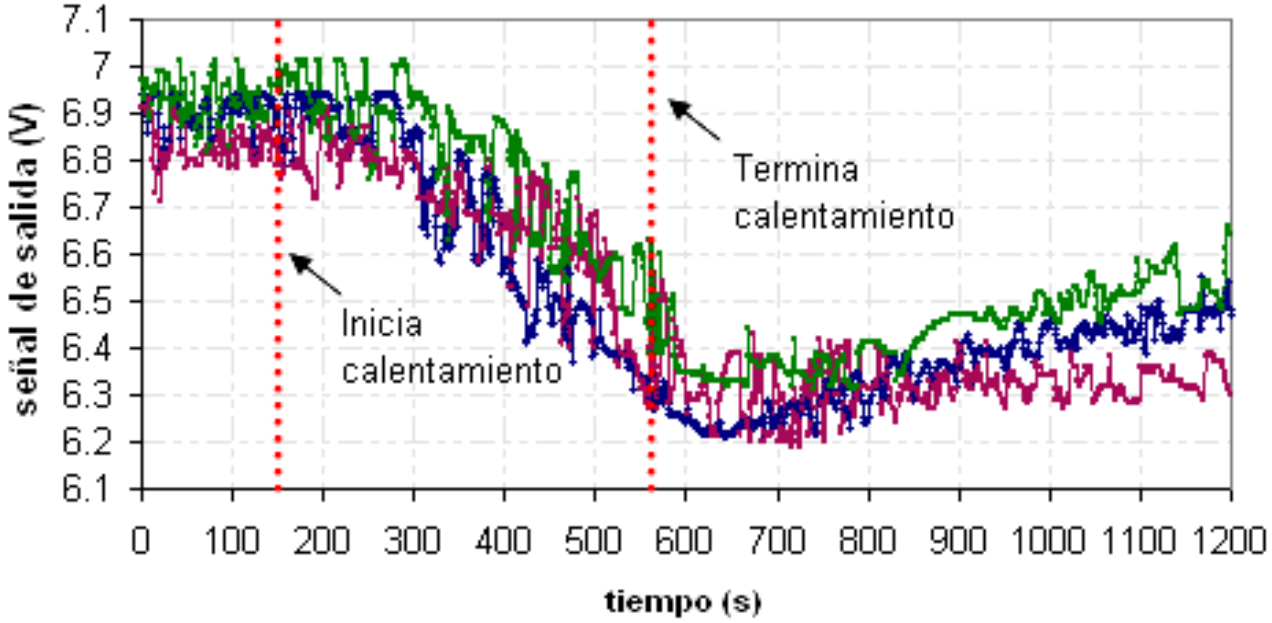
Para la fuente de calor colocada a 3.4 cm del sensor se tiene como máximo valor aplicable el de 0.280 W/cm^2 por lo que las mediciones no abarcan valores mayores. Para el valor de 0.102 W/cm^2 se tiene ya bastante ruido en comparación a nuestra señal teniendo un SNR de aproximadamente de 3.75 por lo que no se trataron de hacer mediciones para valores menores en las que el nivel de ruido deteriorara la respuesta a la salida del sistema de manera que no pudiera tomarse adecuadamente el valor de la caída de voltaje.

Las gráficas 4.9, 4.10 y 4.11 muestran la curva de respuesta para un flujo de calor aplicado de 0.101 W/cm^2, 0.229 W/cm^2 y 0.280 W/cm^2 respectivamente, los otros resultados reportados fueron obtenidos de la misma forma.

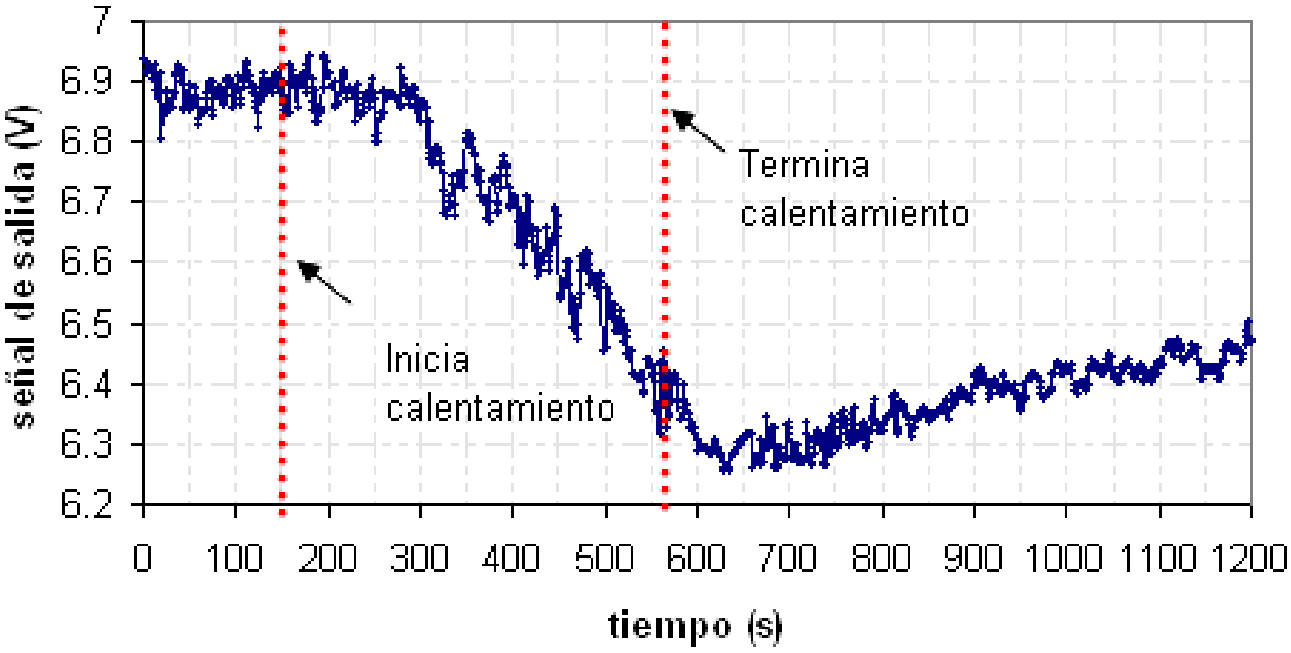
Para el comienzo de la medición la lámpara se encontraba apagada siendo encendida a los 150 segundos, esto fue para observar claramente el nivel inicial de la señal. La fuente de calor fue apagada a los 560 segundos de la medición, es decir que en todos los casos se aplicó un pulso de calor de 410 segundos al sistema para analizar su comportamiento.

Al igual que en la prueba de repetibilidad no se llegó al punto de referencia al finalizar la adquisición de datos por lo que se dejó un periodo de recuperación para que la señal regresara al nivel del punto de referencia para poder realizar la siguiente medición.

Se puede apreciar que el punto de inicio de las mediciones se encuentra en un punto de referencia de 6.9 ± 0.1 V. También es notable que el proceso de enfriamiento presenta una variación mayor que en el calentamiento. La variación de voltaje en cada caso se muestra en la Tabla 4.2.

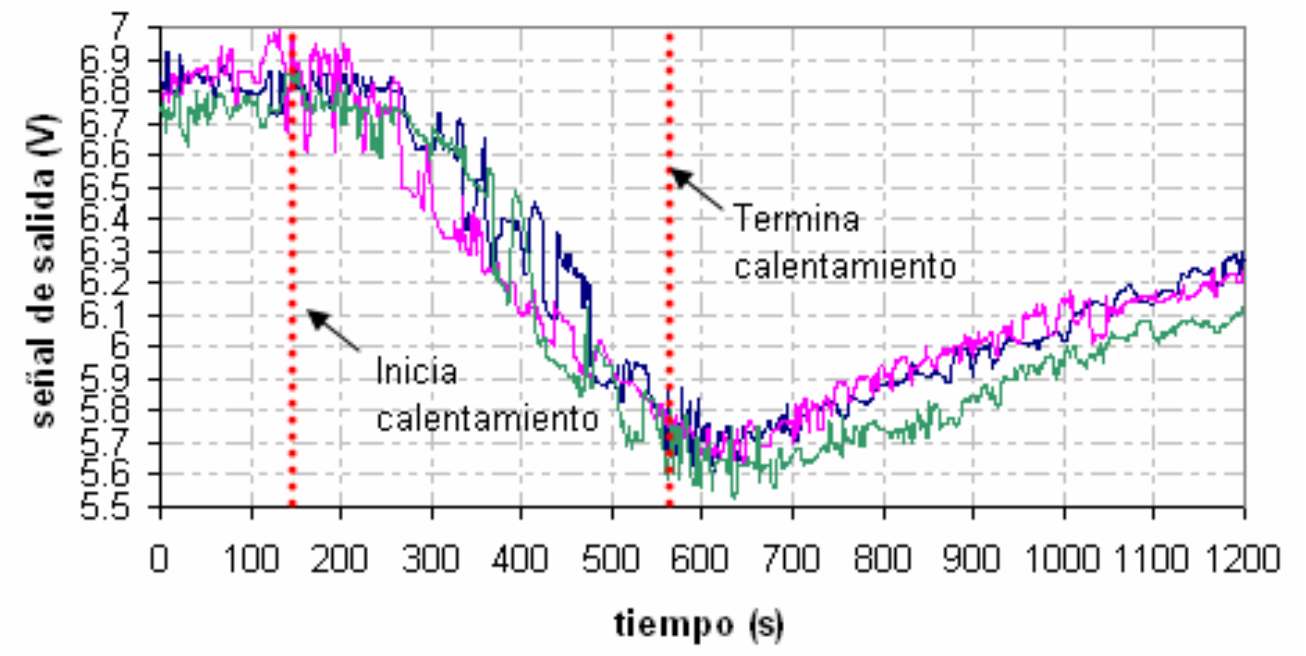


(a)

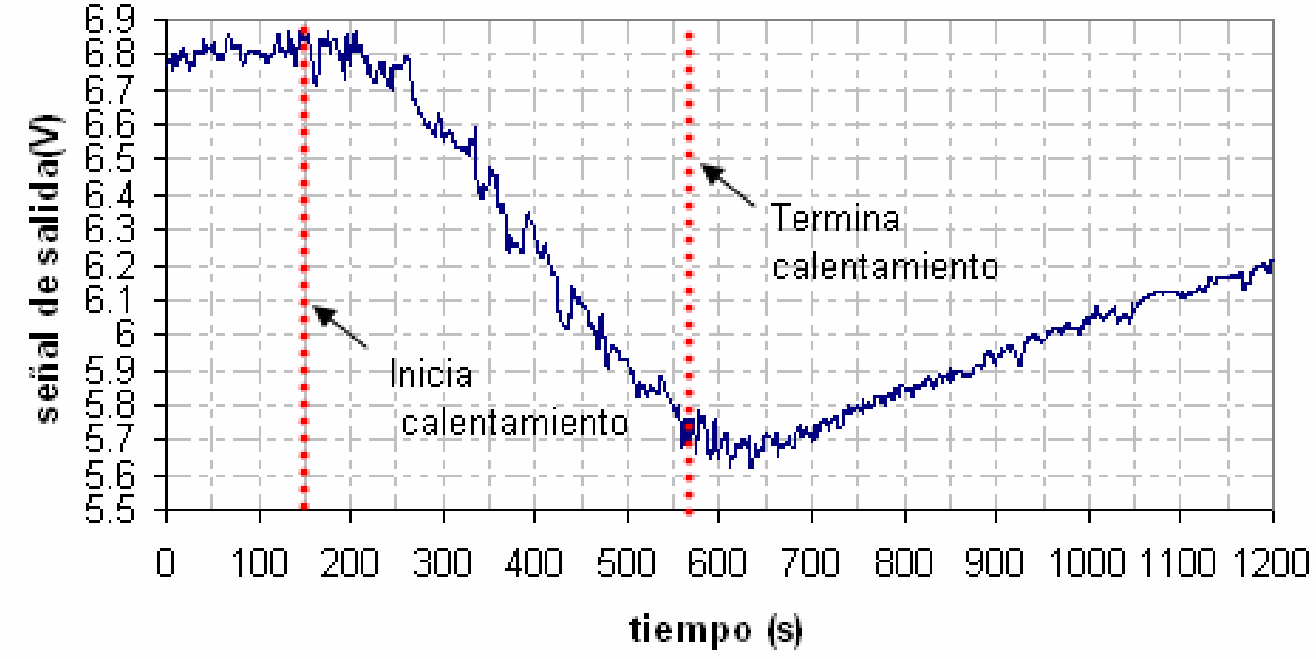


(b)

Figura 4.9 Fuente de calor a 0.101 W/cm^2. (a) Repetibilidad del experimento con tres mediciones. (b) Respuesta promedio

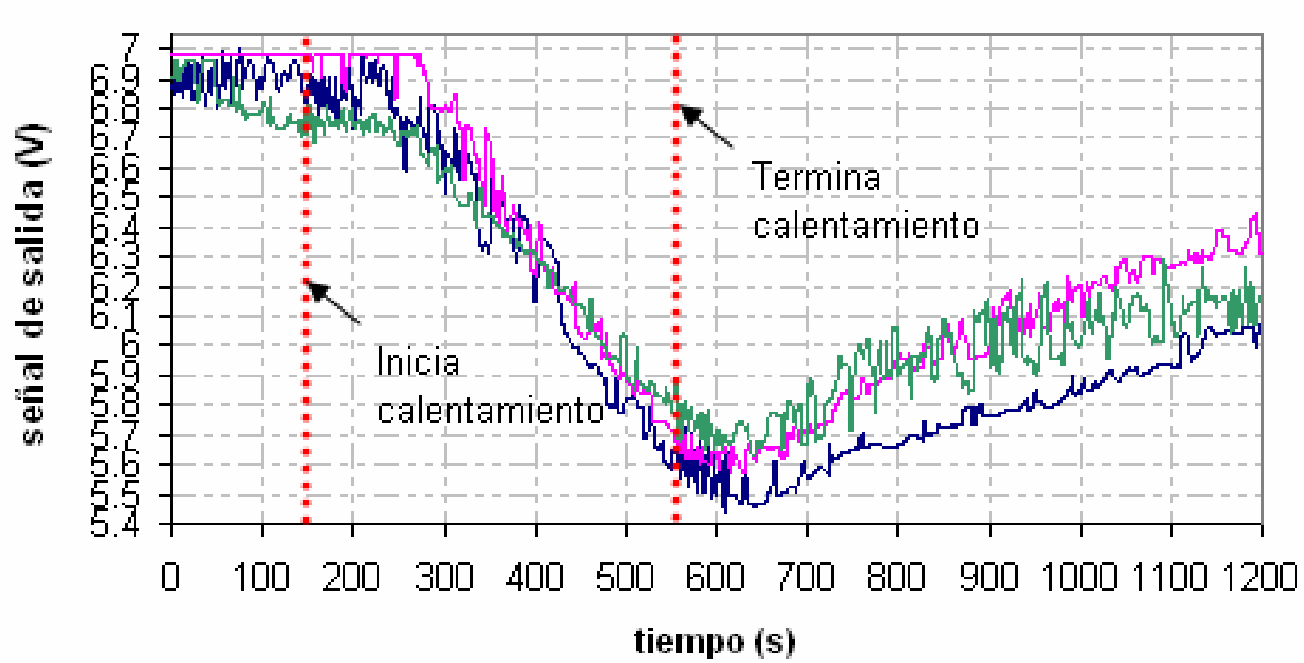


(a)

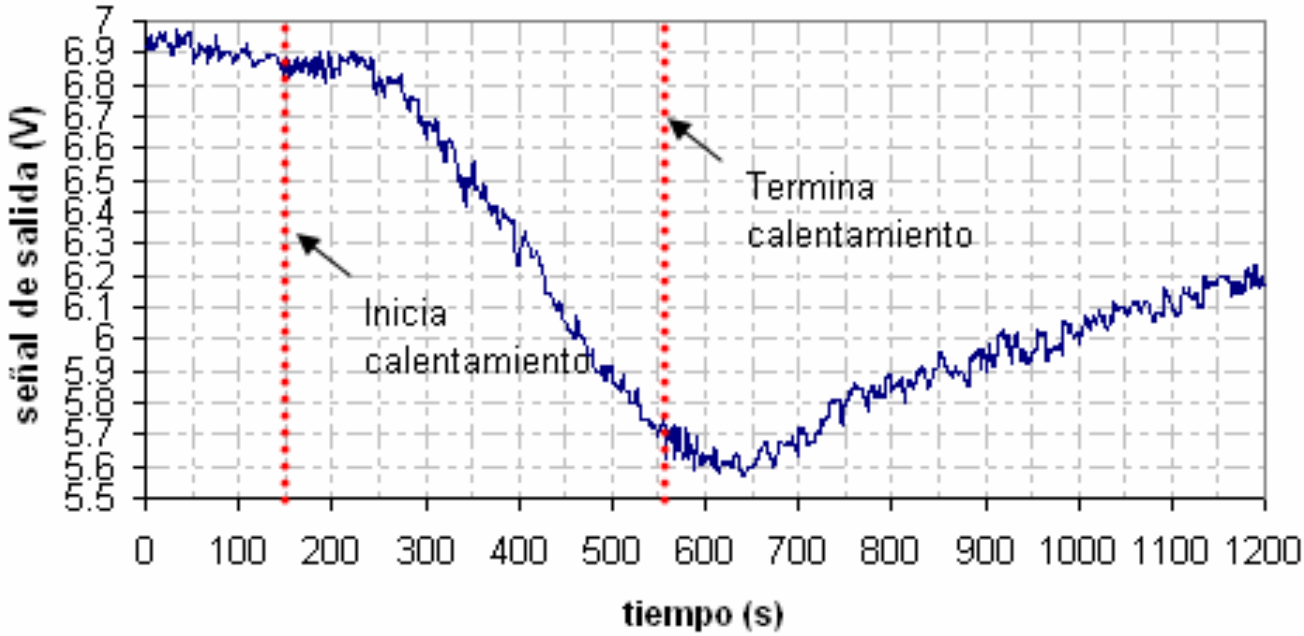


(b)

Figura 4.10 Fuente de calor a 0.229 W/cm^2. (a) Repetibilidad del experimento con tres mediciones. (b) Respuesta promedio



(a)



(b)

Figura 4.11 Fuente de calor a 0.280 W/cm^2. (a) Repetibilidad del experimento con tres mediciones. (b) Respuesta promedio

A partir de las gráficas obtenidas de todos los valores medidos se obtuvo la Tabla 4.2 donde se muestran los resultados.

Flujo de calor (W/cm^2)	Caída de voltaje (V)	sd (V)
0.102	0.6	±0.202
0.127	0.7	±0.255
0.153	0.9	±0.199
0.178	1	±0.255
0.204	1.1	±0.257
0.229	1.15	±0. 221
0.255	1.25	±0.220
0.280	1.3	±0.236

Tabla 4.2 Resultados del sensor de flujo de calor

En la Figura 4.12 se muestra la curva de calibración de la respuesta del sensor a un flujo de calor en forma de un pulso de duración de 410 s. dentro del rango de 0.102 W/cm^2 a 0.280 W/cm^2.

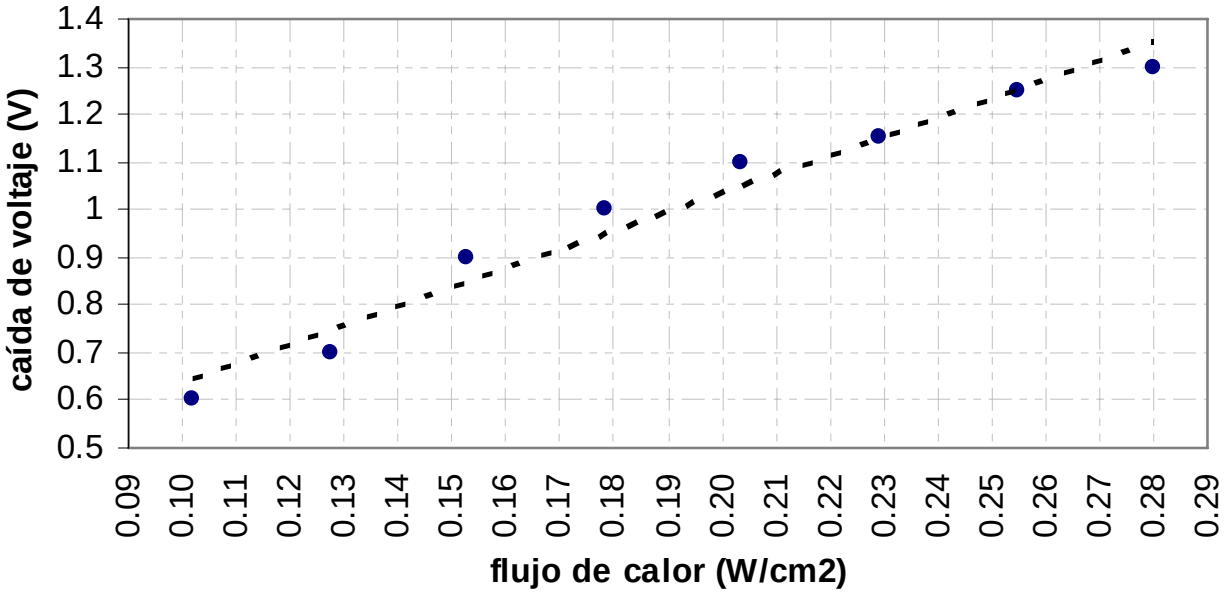


Figura 4.12 Gráfica de resultados del sensor de flujo de calor

Ésta gráfica se ajustó a un comportamiento lineal con un coeficiente de correlación lineal de R = 0.98307 y una desviación estándar de sd ± 0.050 V. La sensibilidad del sistema (pendiente de la curva) para este intervalo de valores fue de 3.97 V/(W/cm^2)

Conclusión

En éste capítulo se muestran los resultados obtenidos del sistema ante el estímulo del flujo de calor dentro del intervalo de 0.102 W/cm^2 a 0.280 W/cm^2 con una desviación estándar de sd = ± 0.050 V para la curva de respuesta del sensor.

Los experimentos realizados para la calibración presenta una desviación estándar de sd = ± 0.211V en las pruebas de repetibilidad y una sensibilidad de 3.97 V/ (W/cm^2).

Si bien esta tesis muestra el proceso de calibración, faltaría hacer mediciones más exhaustivas para determinar la resolución y el rango total del sensor.

Para la mejora de la resolución es necesario resolver el problema del ruido para lo cual debe utilizarse electrónica debajo ruido y medir en condiciones ambientales más estables al efectuar la calibración ya que las vibraciones provocaban variación en la señal de salida debido a la sensibilidad del sensor de ángulo formado por los colimadores.

Un rango mayor de las mediciones se podría lograr cambiando la distancia de la lámpara y utilizando un foco de mayor potencia, así mismo la disminución del ruido contribuiría a detectar señales más pequeñas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se pudo caracterizar el comportamiento de un nuevo diseño para un sensor de flujo de calor mediante su análisis experimental. Este diseño basa su funcionamiento en la medición de cambio de intensidad debida a la fotodeflexión de un haz láser a través de un material termo-óptico por efecto fototérmico.

Para ello primero se realizó la caracterización del sensor de ángulo formado por un sistema de colimadores, es decir, lo que se hizo fue validar el uso del efecto de la deflexión del haz para una medición de este tipo.

La implementación del sensor de ángulo resultó laboriosa debido a que en principio se tenían solo cuatro movimientos: los correspondientes a las coordenadas X, Y y Z donde estaba montado un colimador y el giro en XZ para el otro colimador, sin embargo la localización del haz resultaba realmente difícil., por lo que se decidió controlar el movimiento para el ángulo en YZ, para esto se tuvo que adaptar una platina giratoria en el arreglo con el giro en éste plano tras lo cual se logró posicionar adecuadamente el haz láser.

En el sensor de ángulo se pudo ver una aproximación bastante buena a la curva teórica obtenida logrando también concluir de esta etapa que el desplazamiento lineal que sufre el haz en la deflexión no resulta un movimiento que pueda afectar notablemente nuestras mediciones por lo que podía ser despreciado para los análisis. La sensibilidad obtenida para el sensor de ángulo fue de 1.23 V/min arc.

Para el sistema sensor de flujo de calor se tuvo especial cuidado en la calibración de la fuente de calor debido a que la potencia que está entregando depende completamente de su posición con respecto al sensor.

Un mal acomodamiento para la posición del acrílico en el sistema resultó ser un factor que provocaba pérdidas por reflexiones en la superficie del acrílico. Para éste diseño el posicionamiento del acrílico era algo complicado por lo que sería bueno llevar a acabo una mejora en el montaje que permitiera además la reducción del ruido debido a las vibraciones.

La colocación del bloque de material termo óptico debe ser tal que la cara cubierta con la película negra se encuentre perpendicular al flujo de calor para asegurar que la fotodeflexión se lleve a cabo en una sola dirección además de que de esta forma es posible obtener el valor total de flujo de calor emitido por una fuente.

Se debe tomar en cuenta que las pruebas que consistieron en varias repeticiones de un experimento, tuvieron un tiempo de recuperación entre cada toma de lecturas para permitir que el sistema se recuperara por lo que para su uso en campo es necesario acondicionar un sistema de enfriamiento en el caso de que se quieran realizar varias mediciones seguidas. Otro detalle importante es la posibilidad de cambiar la alimentación de los circuitos para que pase a ser alimentado con fuentes de voltaje más estables para no tener el problema del decaimiento de voltaje en las baterías para las pruebas de larga duración.

Los resultados obtenidos para los cambios de voltaje del sensor de flujo de calor dentro del intervalo de 0.102 W/cm^2 a 0.280 W/cm^2 presentan una desviación estándar de sd = ± 0.211V en las pruebas de repetibilidad, éste resultado puede ser mejorado con la reducción del ruido. La sensibilidad obtenida del sensor de flujo de calor fue de 3.97 V/ (W/cm^2)

Dentro de las ventajas que ofrece este diseño en comparación con otros sistemas sensores de flujo de calor basados en fibra óptica es la posibilidad de aplicación en pruebas de larga duración y su diseño compacto al tratarse de un sensor de intensidad ya que otros sistemas que utilizan la fotodeflexión como principio de funcionamiento son de gran volumen debido a que miden el cambio en ángulo.

Una de las mejoras que se pueden llevar a cabo para éste sistema es en cuanto a la sensibilidad que puede aumentarse de manera proporcional haciendo varios recorridos en el bloque de acrílico.

Se concluye que el diseño propuesto en esta tesis sirve para medir flujo de calor con lo que se alcanzó el principal objetivo de este trabajo. También se logró establecer una metodología de caracterización obteniéndose algunos resultados experimentales de su desempeño aunque faltarían pruebas más exhaustivas para una calibración completa.

Referencias

1. BARNES, Adam. "Improving accuracy in Heat Flux Measurements". *Process Heating*. Nov, 2001. Vol 8, No 10.
2. CHUN, Jaechul et al. "Design and Fabrication of Micro Heat Flux Sensor". *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 1999.
3. MARTINS, N. et al. "Experimental Verification and Calibration of the blow-off Heat Flux Sensor". *Applied Thermal Engineering*. 1998. Vol. 18, no 6.
4. VÖlKEIN; KESSLER. "Thermoelectric Microsensor for Heat Flux Measurement". *17th International Conference on Thermoelectrics.* IEEE. 1988.
5. BALLESTRÍN; MONTERREAL. "Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation". *Energy 29*. 2004
6. SHEN, Yonghang et al. "Fiber-optic system for heat flux measurement". *Review of Scientific Instruments*. Abril, 2004. Vol. 75, No 4.
7. MAC PHERSON, W.N. et al. "Heat flux measurement using fibre-Bragg-grating Fabry-Pérot" sensors. *Meas. Sci. Techno*l. Septiembre, 1999. Vol 10
8. YU, F.; YIN, S. *Fiber Optic Sensors*. Marcel Dekker, Inc. New York, Basel, 2002.
9. SALEH, B.; TEICH, M. *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons, 1991.
10. MARCUSE, D. "Loss Analysis of Single-Mode Fiber Splices". *The Bell System Technical Journal.* May-Jun, 1977.Vol. 56, No 5.
11. MARCUSE, D. *Light Transmission Optics*. Van Nostrand Reinhold Electrical.1982
12. IZUKA, Keigo. *Elements of Photonics: in free space and special media.* Wiley series in pure and applied optics. Wiley-Interscience, 2002
13. SPEAR, Jonathan; RUSSO, Richard. "Transverse photothermal beam deflection within a solid". *Journal of Applied Physics*. Julio, 1991. Vol. 70, No 2.
14. ALMOND, D. P.; PATEL, P. M. *Photothermal Science and Techniques.* Chapman & Hall, Londres U.K. 1996.
15. SANDOVAL-ROMERO, G.E. et al. "Heat flux sensor based on photothermal beam deflection for thermal characterization of liquids". *Laser Optics 2003 - Solid State Lasers and Nonlinear Frequency Conversion*, 2004, p 274-284.
16. SÁNCHEZ-PÉREZ, Celia et al. "Referencing Scheme for Noise Reduction in Fiber Optic Intensity Modulated Sensors". *Optics Letters*. Julio 1, 2004. Vol. 29, No 13.
17. YAO, Shi-Kay; ASAWA, Charles. "Fiber Optical Intensity Sensors". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications.* Abril, 1983. Vol. SAC-1, No 3.