

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

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

1.1 Calor

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

1.1.1 Mecanismos de transferencia de Calor

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

1.1.1.1 Conducción

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

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

1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

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

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

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

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

k es la conductividad térmica del material

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

1.1.1.2 Convección

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

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

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

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

donde: h es el coeficiente de convección

T_s es la temperatura de la superficie

T_{∞} es la temperatura del fluido

1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

1.1.1.3 Radiación

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

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

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

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

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

donde: 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.

1.1.2 Flujo de calor

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

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

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

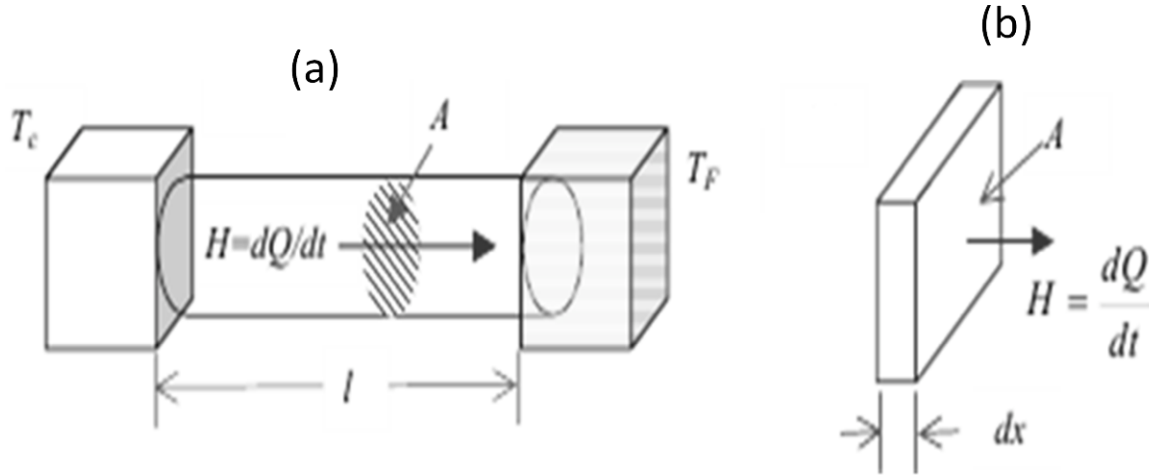


Figura 1.1 (a) Transmisión del calor a lo largo de una barra de materia, aislada por las caras laterales, de longitud l con un extremo caliente (T_c) y el otro frío (T_f). (b) Transmisión de calor a través de un elemento de materia de espesor infinitesimal dx .

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

Esta expresión también puede escribirse como:

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

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

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

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

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

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

1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

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

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

1.1.3 Definición del efecto fototérmico

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

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

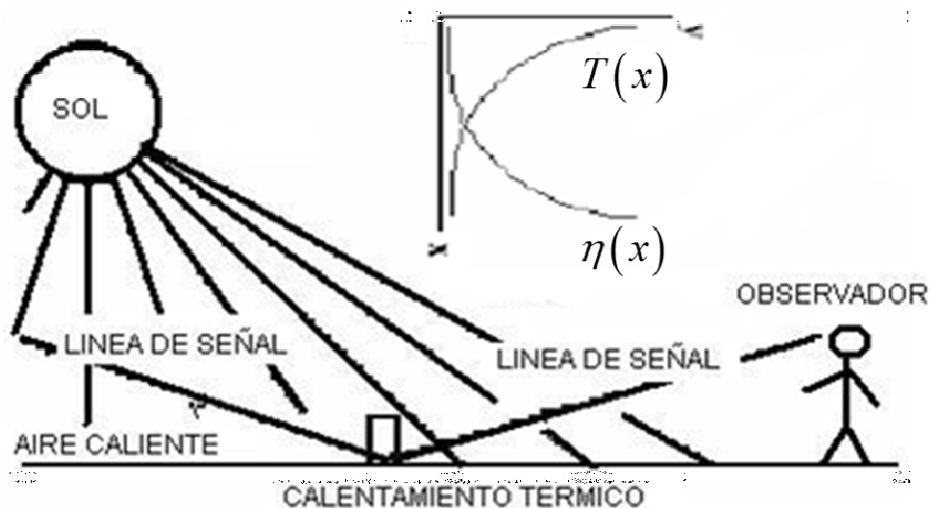


Figura 1.2. Esquema del efecto mirage

1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

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

1.1.4 Deflexión de un haz debido al efecto fototérmico

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

Para determinar el ángulo de deflexión 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 [14]:

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

Donde:

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

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

n es el índice de refracción

∇T es el gradiente de temperatura transversal al camino óptico del haz incidente

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

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

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

1.2 Propagación de un haz en una fibra óptica monomodal

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

1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

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

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

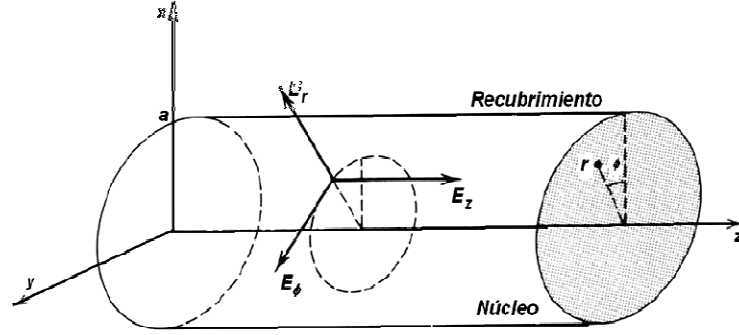


Figura 1.3: Sistema coordenado cilíndrico utilizado en fibra óptica

Para fibras ópticas de contraste bajo en las que $\frac{n_1}{n_2} \ll 1$, donde n_1 es el valor de índice de

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

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

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

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

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

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

Tomando como:

1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

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

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

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

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

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

Con soluciones:

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

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

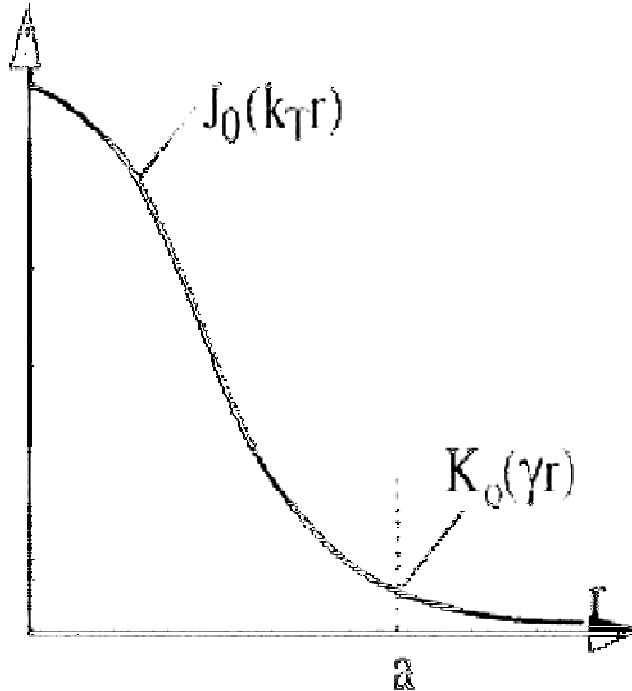


Figura 1.4: Distribución radial del campo para el modo fundamental

1.3 Haz gaussiano

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

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

1.3.1 Colimación de un haz gaussiano

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

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

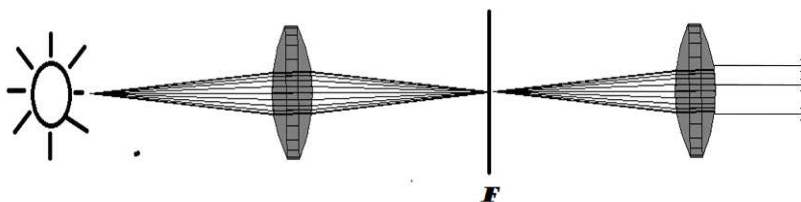


Figura 1.5. Arreglo de un colimador.

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

1.4 Sensores de Intensidad

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

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

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

1.4.1 Clasificación

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

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

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

1.4.2 Parámetros de funcionamiento

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

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

1.5 Sensores de flujo de calor publicados recientemente

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

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

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

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

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

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

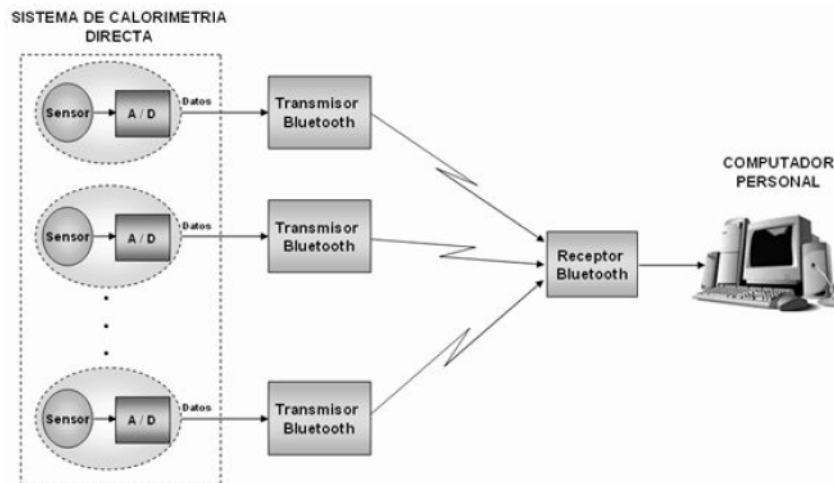


Figura 1.6: Esquema de funcionamiento del sensor de flujo de calor por calorimetría directa

1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

DESIGN AND FABRICATION OF MICRO HEAT FLUX SENSOR[3]

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

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

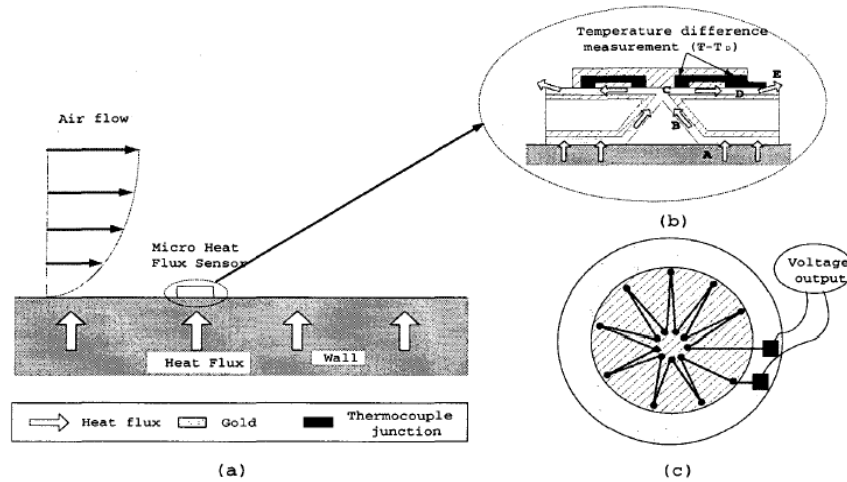


Figura 1.7: Principio de funcionamiento del micro sensor de flujo de calor

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

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

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

1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

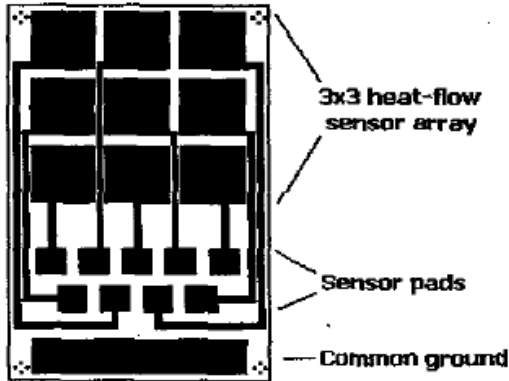


Figura 1.8: Arreglo del sensor de flujo de calor

FIBER-OPTIC SYSTEM FOR HEAT FLUX MEASUREMENT[19]

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

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

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

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

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

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

1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

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

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

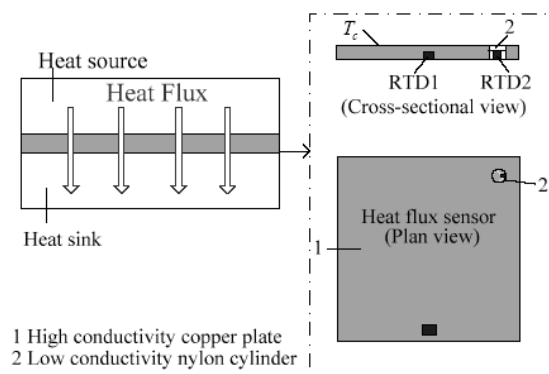


Figura 1.9: Esquema de funcionamiento del sensor de flujo de calor basado en un sistema de placas planas

SISTEMA EN FIBRA ÓPTICA PARA EL SENSADO DE FLUJO DE CALOR^[18]

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

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

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

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

1.6 Conclusiones del capítulo

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

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

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